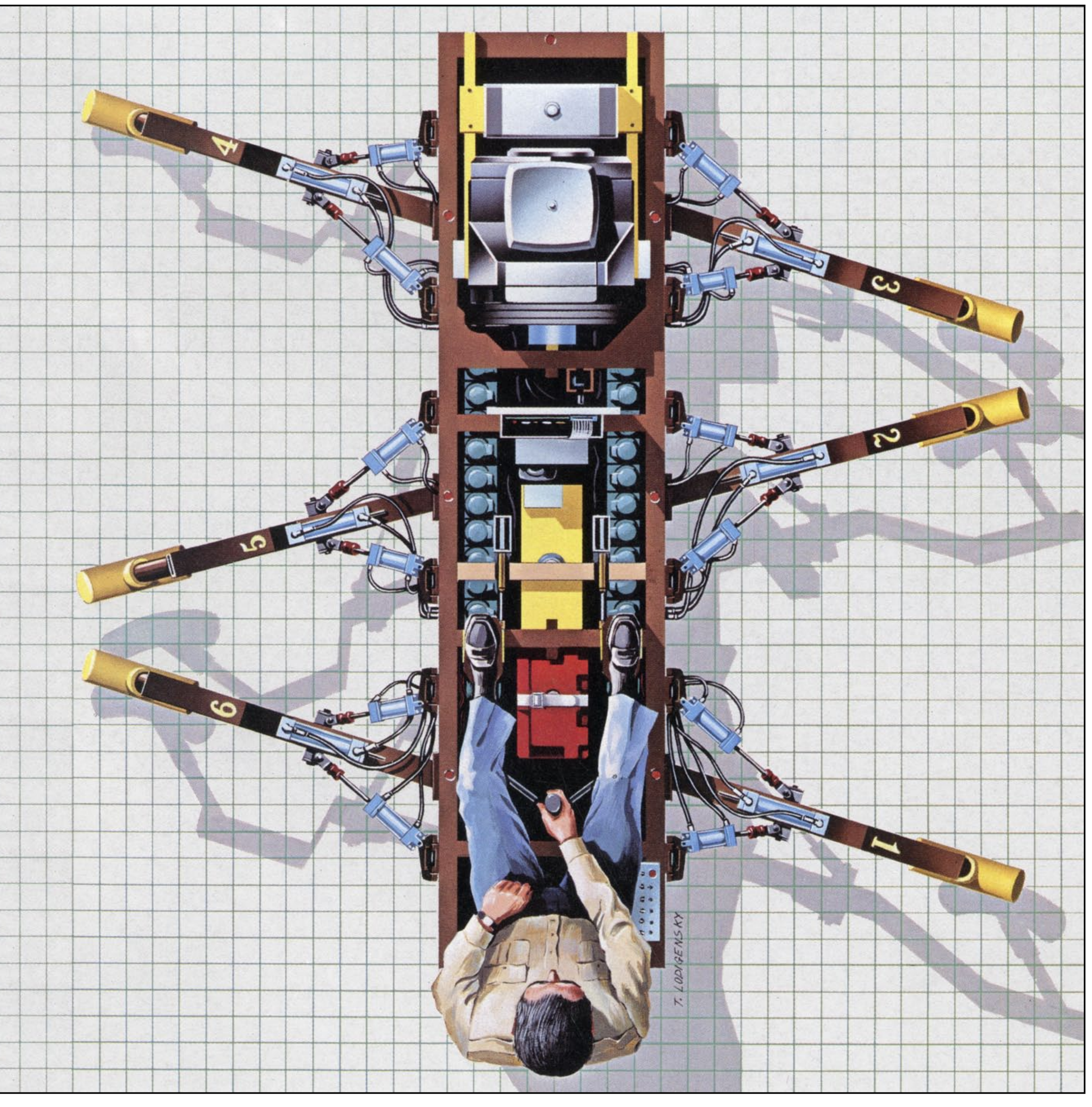
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



MAQUINAS QUE CAMINAN

Marzo 1983
350 Ptas.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 78
Marzo 1983

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

EDITA Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

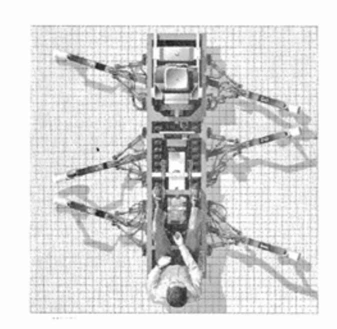
Pedro Negro López: *Cultivo a gran escala de células de mamífero*; Heliodoro Ruipérez García: *Máquinas que caminan*; Alfredo Carrato Ibáñez: *Células ciliadas del oído interno*; Elisa Villa Otero: *Huellas de pisadas de animales extintos*; Emilio Gelpí: *Espectroscopía de RMN de células vivas*; Andrés Lewin Richter: *Física de los tubos de órgano*; Manuel Puigcerver Zanón: *Origen de la radiación cósmica X de fondo*; Luis Bou: *Temas metamágicos*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

Departamento de energía nuclear, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid

Libros:

Gabriel Lorente; Luis Alonso, Emilio Pascual Vázquez y O. León García



LA PORTADA

La ilustración de portada representa una máquina con seis patas que camina bajo el control de un microprocesador que lleva incorporado (véase "Máquinas que caminan" de Marc H. Raibert e Ivan E. Sutherland, en este número). Para ser más precisos, la máquina repta, esto es, emplea un método de locomoción que no requiere atención al equilibrio. Al menos tres de las seis patas están siempre en el suelo para proporcionar un soporte trípode. El microprocesador opera con los datos suministrados por los sensores, que le indican la posición de cada pata y la fuerza que actúa sobre ellas. El conductor gobierna la máquina haciendo que las patas de un lado se muevan más deprisa que las del otro. Modifica la postura del cuerpo y su altura respecto al suelo y ayuda al microprocesador en la selección de los lugares adecuados donde apoyar los pies. La potencia la suministra un motor de gasolina de 18 caballos de vapor; unos actuadores se encargan de mover las patas. La virtud de estas máquinas reside en funcionar en terrenos donde los vehículos con ruedas u orugas resultan ineficaces.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 3.850 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 52 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
350 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
450 pesetas

Distribución para España
Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49 - Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - Madrid-30
Tel. 430 84 81
Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.° - Barcelona-34
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Ted Lodigensky

Página	Fuente
9	Jack C. Wahl, Monsanto Company
10-14	Jerome Kuhl
15	Jerome Kuhl (*arriba*); Joseph Feder y William R. Tolbert, Monsanto Company (*abajo*)
19	Leg Laboratory, Universidad Carnegie-Mellon
20-26	George V. Kelvin
27	R. F. Bonifield
28	R. F. Bonifield, cortesía de la Biblioteca Pública de Nueva York
31	Richard A. Jacobs, Instituto de Tecnología de California
32	Bunji Tagawa
33	A. J. Hudspeth
34-36	Bunji Tagawa
37	A. J. Hudspeth
38-40	Bunji Tagawa
50	Suzanne Swibald
52-58	Patricia J. Wynne
59	Philip J. Currie
60	Giuseppe Leonardi
61	Museo Americano de Historia Natural
65-72	Gabor Kiss
75	Pieter Stroethoff
76	Andrew Christie

Página	Fuente
77	Neville H. Fletcher
78-79	Andrew Christie
80	Pieter Stroethoff
81	Neville H. Fletcher
82-83	Andrew Christie
87	© 1960 National Geographic Society-Palomar Observatory Sky Survey. Reproducido con permiso del Instituto de Tecnología de California (*arriba*); Gary A. Chanan, Universidad de Columbia (*abajo*)
88	Ilil Arbel
89	Walken Graphics
90	© 1960 National Geographic Society-Palomar Observatory Sky Survey. Reproducido con permiso del Instituto de Tecnología de California (*arriba*); Gary A. Chanan, Universidad de Columbia (*abajo*)
92	Bruce Margon, Universidad de Washington (*derecha*); Ilil Arbel (*izquierda*)
94-96	Ilil Arbel
98-106	Bernardo Martí Oliver
113	Lee Sallows
117-121	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - Barcelona-5
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S. A.
Napoles, 249 - Tel. 207 40 11
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

JOSEPH FEDER y WILLIAM R. TOLBERT ("Cultivo a gran escala de células de mamífero") están adscritos al departamento de investigación de la Compañía Monsanto y han trabajado conjuntamente en el tema de que trata el artículo durante los últimos ocho años. Feder se licenció en 1953 por la Universidad de Rooselvelt, doctorándose en bioquímica, en 1964, por el Instituto de Tecnología de Illinois. Es profesor adjunto de bioquímica de la Universidad de Missouri en San Luis. Tolbert es jefe de grupo de investigación en Monsanto. Licenciado por la Universidad de Richmond (1964), se doctoró en biofísica (1971) por la de Wisconsin en Madison. En 1971 y 1972 investigó en la Universidad Duke. De 1972 a 1974 fue becario postdoctoral en el Hospital General de Allegheny.

MARC H. RAIBERT e IVAN E. SUTHERLAND ("Máquinas que caminan") ejercen funciones docentes en la Universidad de Carnegie-Mellon. Han colaborado y competido en la construcción de máquinas capaces de caminar desde 1979. Raibert escribe: "Terminado el doctorado en el Instituto de Tecnología de Massachusetts marché al Jet Propulsion Laboratory del Instituto de Tecnología de California (Cal Tech), donde trabajé en una serie de projectos sobre robótica. Fue durante mi estancia en el J.P.L. cuando conocí a Ivan Sutherland, a la sazón director del departamento de ordenadores. Ivan y yo comenzamos a hablar de posibles proyectos. Comenté que podríamos aprender bastante sobre locomoción con los palos saltarines. Me sorprendió el entusiasmo que demostró por la idea y que se hiciera con 3000 dólares para construir un primer modelo; a partir de entonces comenzó a dedicar parte de su tiempo a construir un caminante neumático". Sutherland, que se formó también en el MIT y ha colaborado con diversas universidades y empresas, añade: "Trabajé en robótica durante mis años de estudiante, pero mi investigación siguió luego otros derroteros hasta que Marc Raibert avivó mi apagado interés por la locomoción, en 1979. Desde entonces he dedicado la mitad de mi tiempo a la robótica. La otra mitad queda para los negocios.

A. J. HUDSPETH ("Células ciliadas del oído interno") ha venido enseñando biología en el Instituto de Tecnología de California, desde 1975. Acaba de firmar un contrato con la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Francisco. Cursó estudios en Harvard, recibiéndose de doctor en medicina en 1974. Ese año visitó, becado, el Hospital Karolinska.

DAVID J. MOSSMAN y WILLIAM A. S. SARJEANT ("Huellas de pisadas de animales extintos") son geólogos a los que une un interés común por la materia sobre la que versa su artículo. Mossman es canadiense. Comenzó su carrera en la Universidad Dalhousie de Nueva Escocia, por la que obtuvo la licenciatura en ciencias. Se trasladó entonces a Nueva Zelanda para continuar su formación, doctorándose por la Universidad de Otago. Posteriormente regresó a Canadá para incorporarse al claustro docente de la Universidad de Saskatchewan, en la que dio clases desde 1971 hasta 1982, dejando esta tarea para dedicarse a su trabajo actual como profesor asociado de geología económica de la Universidad Mount Allison de New Brunswick. Su principal campo de investigación son los depósitos minerales. Sarjeant nació y se educó en Inglaterra, obteniendo la licenciatura y el doctorado en ciencias por la Universidad de Sheffield. Después de formar parte durante breve tiempo del cuerpo docente del University College de North Staffordshire y de la Universidad de Reading, pasó, en 1963, a la Universidad de Nottingham, y allí permaneció hasta 1972. Ese año se trasladó al Canadá para enseñar ciencias geológicas en la Universidad de Saskatchewan. Entre los campos de investigación por los que se interesa se cuenta la palinología, es decir, el estudio de los pólenes y esporas fósiles.

R.G. SHULMAN ("Espectroscopía de RMN de células vivas") es profesor de biofísica molecular, bioquímica y química y director de la división de ciencias biológicas en la Universidad de Yale. Se educó en la de Columbia, por la que es licenciado y doctor en química (1949). En 1949 y 1950 fue becario de la Comisión de Energía Atómica en el Instituto de Tecnología de California. De 1950 a 1953 fue jefe de investigación en semiconductores de la Hughes Aircraft Company. Desde 1953 hasta 1979 trabajó para los Laboratorios Bell, trasladándose luego a Yale. Además del tema de su artículo, se interesa por el estudio de las lesiones del ADN por radiación, la genética de bacterias y virus y la formación de complejos paramagnéticos metal-ion de los ácicos nucleicos.

NEVILLE H. FLETCHER y SUSZANNE THWAITES ("Física de los tubos de órgano") trabajan en la Universidad de Nueva Inglaterra en Australia. Fletcher inició su carrera en la Universidad de Sydney; la terminó en Harvard. Se interesó en principio por la física del estado sólido y la física de las nubes, pero en los últimos diez años ha dedicado especial atención a la acústica musical y a los mecanismos de generación sonora en los animales. Preside el Instituto Australiano de Física y dirige la secretaría de Ciencias Físicas de la Academia Australiana de Ciencias. Thwaites se licenció por la Universidad de Australia Occidental, donde investigó sobre la formación del granizo.

BRUCE MARGON ("Origen de la radiación cósmica X de fondo") es profesor de astronomía y director del departamento de astronomía de la Universidad de Washington. Cursó el primer ciclo en la Universidad de Columbia y obtuvo el doctorado en astronomía, en 1973, por la de California en Berkeley. Pasó por el University College de Londres y la Universidad de California en Los Angeles. En la actualidad es investigador asociado de la Fundación Alfred P. Sloan. En 1981 le fue concedido el premio Newton Lacey Price de la Sociedad Astronómica Americana. La astronomía de rayos X extrasolares, la astronomía ultravioleta y las observaciones de las fuentes de rayos X mediante radiación visible constituyen sus principales campos de atención.

BERNARDO MARTI OLIVER ("Inicios de la agricultura en la Península Ibérica") es miembro del Servicio de Investigación Prehistórica de la Diputación Provincial de Valencia. Doctor en geografía e historia por la Universidad de Valencia, de cuyo departamento de arqueología fue profesor, su trabajo de investigación se centra en el Neolítico de la vertiente mediterránea de la Península Ibérica, especialmente en los problemas del Neolítico valenciano. Autor de diversos artículos y monografías, además de otros trabajos que comprenden desde el Neolítico a la Edad del Bronce, dirige las excavaciones que el Servicio de Investigación Prehistórica lleva a cabo en el yacimiento de la Cova de l'Or (Beniarrés), así como su estudio y publicación.

Hace...

José M.ª López Piñero

...trescientos años

Murió en Madrid Gaspar Bravo de Sobremonte, quizá la figura más representativa y prestigiosa, en la España de mediados del siglo XVII, del tradicionalismo científico moderado, que aceptó numerosos elementos de las corrientes modernas, pero como meras rectificaciones de detalle que no afectaban la validez general de las doctrinas científicas clásicas.

Había nacido el año 1603 en la localidad palentina de San Cristóbal de Sobremonte e hizo sus primeros estudios en Aguilar de Campóo. Se trasladó después a Valladolid, en cuya universidad se graduó de bachiller en medicina (1630) y doctor en medicina (1637). Muy tempranamente participó en las oposiciones a cátedras de dicho centro universitario, obteniendo ya en 1632 una de la Facultad de Artes. Desde 1637 hasta 1659, ocupó sucesivamente cinco cátedras médicas: las de Cirugía, Método, Vísperas, Prima de Hipócrates y Prima de Avicena. A partir de 1659 fue médico de cámara, primero de Felipe IV y más tarde de Carlos II. También desempeñó el cargo de médico primario de la Inquisición.



Retrato de Gaspar Bravo de Sobremonte fechado en 1653

Bravo de Sobremonte fue autor de una voluminosa obra escrita que, a través de numerosas ediciones, tuvo una notable difusión dentro y fuera de España. Publicó primero unas *Resolutiones Medicae* (1649) a las que añadió, a partir de la tercera edición, una monografía sobre la circulación de la sangre y una serie de dieciocho *Consultationes Medicae.* Su segundo libro fue el titulado *Praelectiones Vallis-oletanae de purgandi ratione* (1651). El tercero, *Disputatio apologetica pro Dogmatica Medicina prestantia* (1669), incluía una nueva serie de diez "consultas" y una guía de medicina práctica para los principiantes. Sus *Resolutiones ac Consultationes Medicae* fueron reunidas en tres volúmenes impresos en Colonia (1671 y 1674) y en Lyon apareció una edición en cinco de sus *Opera Medicinalia* (1654-1684), cuyos tres últimos volúmenes corresponden a obras que no habían sido publicadas anteriormente.

La postura "moderada" de Bravo ante la renovación científica se refleja de modo paradigmático en la monografía que, como acabamos de decir, dedicó a la circulación de la sangre y que tituló *De sanguinis circulatione et de arte sphygmica.* En ella admitió plenamente la doctrina circulatoria de Harvey, enfrentándose explícitamente con famosos galenistas de su época que se negaban a aceptarla: "Hipócrates, Galeno, Avicena y los demás clásicos consideran que para la conservación de la vida el corazón es el más importante de los órganos principales, ya que genera los espíritus vitales y los transmite a través de las arterias a todas las partes de



Grabado alegórico que figura en la edición de Colonia (1671 y 1674) de las Resolutiones ac Consultationes Medicae, *de Gaspar Bravo de Sobremonte*

nuestro cuerpo, para vivificar y conservar el calor innato. William Harvey, médico del rey de Inglaterra en nuestro tiempo, afirma que el corazón desempeña otra función, que llama circulación de la sangre. Supone que toda la sangre que se forma en el hígado llega a través de la vena de la cava ascendente a la aurícula derecha, en la que penetra cuando el corazón se dilata. Cuando se contrae, pasa a las arterias y por ellas se lleva a las partes orgánicas para que se nutran. La sangre que sobra es enviada por las mismas arterias a las venas a través de anastomosis. Por las venas llega al hígado y la vena cava ascendente y vuelve al corazón junto con la sangre formada de nuevo, moviéndose de este modo en círculo continuamente. Llama a este movimiento circulación de la sangre y afirma que para ella está hecho el corazón. Entre los autores más recientes se ha producido una célebre polémica acerca de si hay que admitir dicha circulación. James Primerose y Parigiano han intentado impugnarla con todas sus fuerzas y Plemp se ha unido a ellos en algunas ocasiones... La circulación de la sangre, desconocida por los antiguos, resulta necesario admitirla por las demostraciones y fundamentos aducidos por los autores actuales. El primero que la demostró fue Harvey, al que siguieron Highmore, Conring, Pecquet y otros anatomistas más recientes...". En la misma obra, Bravo defendió también la "circulación de la linfa", llegando a afirmar que "Galeno y los demás autores antiguos no pudieron conocer los vasos quilíferos porque hacían anatomía solamente en los cadáveres, en los que estos vasos no aparecen, sino que sólo lo hacen en los animales vivos después de seis horas de ingerido el alimento". Elogió no solamente la obra de Harvey, sino las de Jean Pecquet, Caspare Aselli, Nathaniel Highmore y otros autores modernos. Sin embargo, tras haber rectificado de forma inequívoca la fisiología cardiovascular tradicional, mantuvo intocada el "arte esfígmica" o exploración diagnóstica de los trastornos del pulso, propuesta por los clásicos. "La definición dada por Galeno explica completamente la naturaleza del pulso", afirmó de modo terminante.

Otro tanto hay que decir de la actitud de Bravo ante la iatroquímica. Declaró inaceptable su introducción en las doctrinas patológicas, llenando de insultos a Paracelso y a sus seguidores en cinco textos dedicados a este tema. En cambio, aceptó los medicamentos químicos, "puesto que el médico dogmático debe conocer las acciones de todos los remedios que son útiles para curar las enfermedades, si éstos se aplican científicamente", y "los medicamentos espagíricos son utilizables para curar muchas enfermedades, si se aplican debidamente". La química o "ars spagyrica" no debe considerarse como una secta, sino como un recurso técnico que complemente la medicina dogmática. Los galenistas franceses de estos años se opusieron rotundamente a la utilización del antimonio. Bravo de Sobremonte, por el contrario, le dedicó el estudio *De Stibii natura, et usu,* en el que recomienda su empleo, aunque de acuerdo con los principios tradicionales.

La contradicción que implicaba la postura de Bravo fue advertida por otros médicos españoles de su generación y de la siguiente. No obstante, la forma de superarla fue muy distinta según se estuviera decidido o no a romper con las doctrinas galénicas. Los que se aferraron a estas últimas prefirieron negar incluso las novedades más innegables antes que comprometer el sistema tradicional. Esta actitud explica el galenismo intransigente de autores de la talla de Matías García, que dedicó su vida a refutar la doctrina de la circulación sanguínea. En el polo opuesto, los partidarios de romper con las doctrinas tradicionales fueron *novatores* como Juan de Cabriada, que adoptaron el sistema iatroquímico y consideraron que la doctrina circulatoria, lejos de ser una rectificación de detalle, era el "nuevo sol de la medicina". Hay que advertir,

sin embargo, que la postura "moderada" o ecléctica de Bravo tuvo numerosos seguidores hasta finales de la centuria, entre los que se encuentran figuras de notable importancia científica como Joan d'Alós.

Bravo de Sobremonte fue, por otra parte, un brillante clínico, que recogió principalmente su rica experiencia en las dos series de las "consultationes". Se incluye en ellas la historia clínica, con informe de autopsia, de la calculosis renal que produjo la muerte a Felipe IV: "El 8 de abril de 1665, nuestro católico y poderoso Rey de las Españas y de las Indias, el gran Felipe IV, cumplió sesenta años. Falleció el 17 de septiembre siguiente, a las cuatro de la mañana. Desde niño había padecido una fluxión catarrosa a la que no puso remedio alguno. Aparte de ella, no sufrió ninguna otra afección hasta llegar a viejo, adquiriendo entonces varias enfermedades que se fueron acumulando. La primera de ellas fue un entorpecimiento del brazo y la pierna del lado derecho que con el tiempo se extendió al izquierdo, llegando casi a la parálisis. Más tarde le sobrevino un marasmo o consunción de todo el cuerpo. A ello siguió, durante los tres años anteriores a su muerte, una disuria periódica que, asociada luego a una nefritis, se hizo continua, apareciendo, por último, micción de sangre... Fuimos encargados de embalsamar el cadáver y, como el Rey se había quejado a menudo del riñón derecho y había expulsado varios cálculos, abrimos dicho riñón para resolver la duda de si la micción de sangre se había debido a los cálculos o a una úlcera renal. Practicada la autopsia, lo encontramos muy disminuido de tamaño, con un cálculo encajado en su parénquima de forma y grosor semejante a una castaña, y tres eminencias desiguales a su alrededor. El resto del parénquima renal estaba corrompido y transformado en pus".

Buena parte de los "consultationes" se refieren a problemas tocoginecológicos, por los que Bravo tuvo un especial interés. Entre ellos, destacan la relativa a las convulsiones que afectaron durante el puerperio a la reina Isabel de Borbón y otra dedicada a una "úlcera en la túnica externa del útero". Bravo se enfrentó también con cuestiones quirúrgicas, ofreciendo, por ejemplo, un planteamiento riguroso de las indicaciones de la trepanación craneal. Dignos de mención son, por último, sus estudios médicolegales acerca de los envenenamientos y sobre los indicios de tortura en el cadáver.

Cultivo a gran escala de células de mamífero

Se han diseñado nuevos recipientes para el cultivo de grandes cantidades de células, frágiles y complejas, que sintetizan proteínas de interés clínico, como interferón y anticuerpos monoclonales

Joseph Feder y William R. Tolbert

Ciertas moléculas de gran valor clínico, experimental y, en algunos casos, comercial se obtienen satisfactoriamente por cultivo de las células que las sintetizan, humanas o de otro mamífero. Lo que no significa que sea fácil producir grandes cantidades de células de mamífero cultivándolas en un medio artificial. La tecnología de la microbiología industrial, muy adelantada, se ha desarrollado para trabajar con bacterias, hongos y levaduras. Estas células, encapsuladas en una rígida pared externa, constituyen una suerte de fábrica celular independiente, con requerimientos nutritivos bastante simples: en el caso de las bacterias, la mayoría se conforma con la presencia en el medio de glucosa y algunas sales. Los microorganismos se multiplican activamente, nadando en un medio de cultivo líquido, en tanques de hasta 200.000 litros. No sufren daño alguno por mucho que proliferen hasta formar una suspensión espesa, o se les agite con energía.

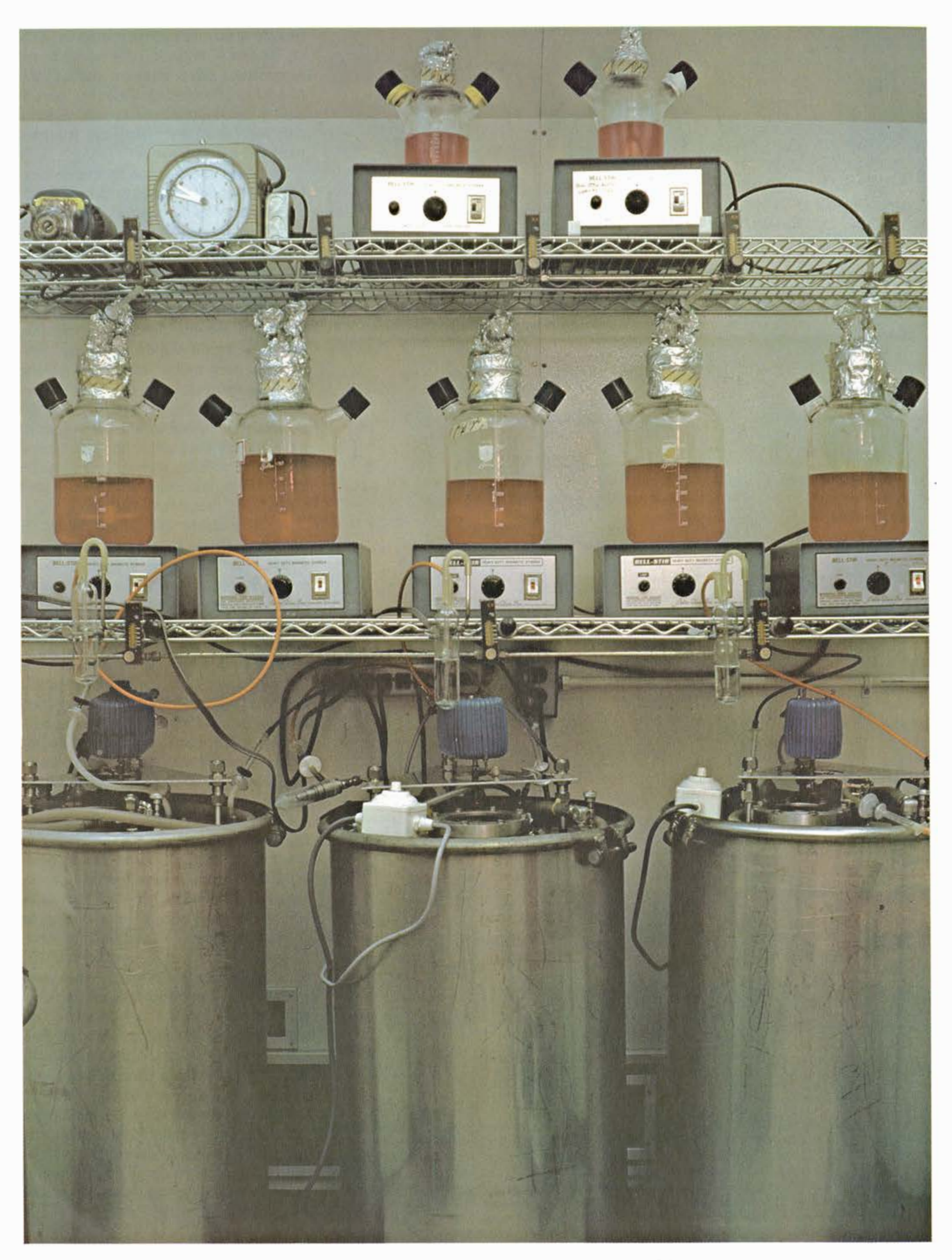
Las células de mamífero se comportan de forma distinta. Son mayores, más frágiles y más complejas que el grueso de los microorganismos. Su delicada membrana plasmática carece de una pared celular consistente. Sus requerimientos nutritivos, en general más específicos que los de la mayoría de microorganismos, no se han establecido todavía con certeza. Una célula de mamífero no es un organismo de vida autónoma. Se trata, por el contrario, de un elemento adaptado a una vida especializada dentro de un tejido; depende, a un tiempo, de las funciones específicas de muchas otras células y de un sistema circulatorio que asegura un ambiente apropiado y estable a cada célula. Células de estas características no soportan su separación del tejido ni se prestan a cultivo en un medio artificial. La mayoría no proliferan si están en suspensión; sólo lo hacen cuando encuentran una superficie propicia a la que fijarse. Con el paso de los años se han desarrollado distintas técnicas de cultivo de células de mamífero, en pequeña escala y en laboratorio. Mas la experiencia prueba que, traspasado ese nivel, por pequeño que sea el salto, resulta muy difícil hacerlas rendir.

Se echan en falta, con apremiante urgencia, métodos de cultivo celular a gran escala. Pensemos en el interferón, sustancia liberada por células animales que inhibe la infección vírica. Aunque se descubrió hace 25 años, seguimos sin conocer su verdadero valor terapéutico. ¿Por qué? Debido, en parte principal, a la dificultad de producir grandes cantidades de células que se apresten a sintetizarlo. Algo parecido sucede con los anticuerpos monoclonales, moléculas dirigidas contra una proteína dada, que se fabrican en los llamados hibridomas, formados por la fusión de una célula secretora de anticuerpo y una célula cancerosa de mieloma. Los animales de experimentación desarrollan hibridomas de ratón fácilmente en forma de tumor; desdichadamente (ya que los anticuerpos monoclonales humanos prometen ser un poderoso agente terapéutico), no ocurre lo mismo con los hibridomas humanos, que sólo proliferan en cultivo.

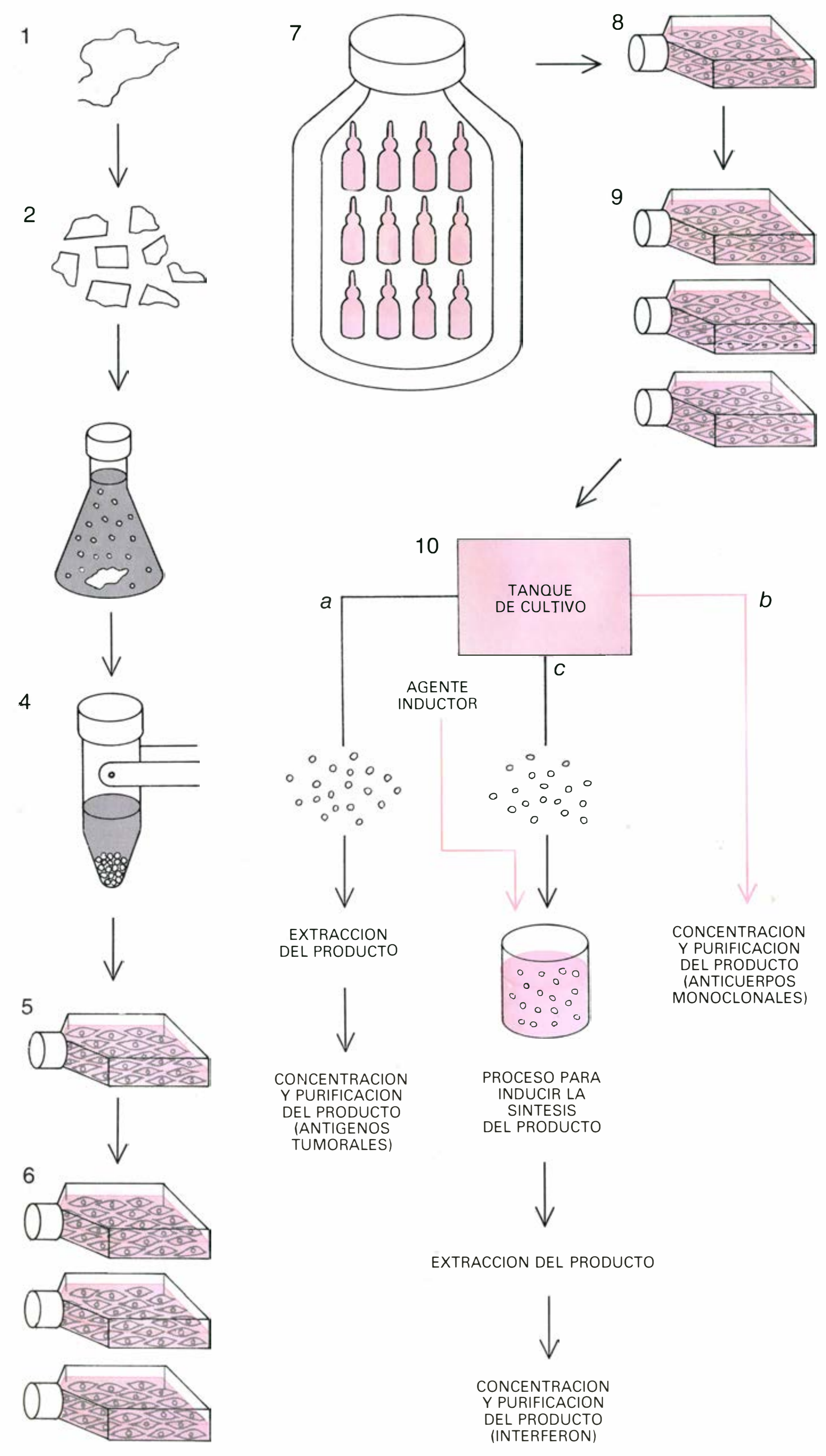
La uroquinasa humana, un enzima que transforma el plasminógeno, inactivo, en el enzima anticoagulante plasmina, es una obvia esperanza en medicina clínica. Una buena fuente de uroquinasa serían las células de riñón humano que, también en este caso, son difíciles de obtener en grades cantidades. Los factores angiogénicos son intermediarios celulares que activan el crecimiento de los vasos sanguíneos. Pues bien, cuando estos factores son específicos de tumor, liberados por las células malignas, parecen fomentar la vascularización y el crecimiento de tumores macizos. Para afrontar la investigación que lleve al desarrollo de drogas capaces de regular la angiogénesis (y quizás el crecimiento de un cáncer) se requieren grandes cantidades de esos factores, como también se necesitan para inducir la revascularización de un tejido por administración directa. Las células humanas disponen en su superficie de antígenos específicos, que sirven de contraseña para distinguir entre células propias y extrañas, o entre tumorales y normales. Los antígenos tumorales polarizan hoy la atención de los investigadores, pero sólo puede disponerse de cantidades apreciables de los mismos a través de un cultivo celular a gran escala.

La demanda de éstas y otras muchas moléculas explica el empeño que se está poniendo en el desarrollo de sistemas productivos de hipercultivos. Dichos esfuerzos no han remitido por los sensacionales avances de la ingeniería genética, moderna metodología seguida para introducir, en bacterias, el gen que codifica una determinada proteína y su eventual inducción a la síntesis de la misma. Muchas moléculas de interés biológico no pueden producirse por este método y, en el caso de una sustancia como el factor angiogénico, que aún no ha podido caracterizarse, el único medio para aislarlo en cantidad apreciable es la extracción a partir de células en cultivo.

Un cultivo celular se establece a partir de un tejido. Este último se disocia, por vía mecánica, enzimática o por combinación de ambas, al objeto de producir una mezcla de células aisladas y pequeños cúmulos de ellas. La



1. TANQUES DE HIPERCULTIVO para células de mamífero. La fotografía está tomada en el laboratorio que los autores tienen en la Compañía Monsanto. Los tres tanques cilíndricos de acero, de 100 litros de capacidad, están destinados al cultivo de células en suspensión. Los recipientes de vidrio de los estantes son botellas de agitación donde se cultivan las células antes de sembrarlas en los tanques mayores. Cada botella reposa sobre un agitador magnético. El color rojo de los medios de cultivo se debe al indicador del *p*H, que debe controlarse estrictamente, igual que la concentración de oxígeno y CO_2.



2. PROCEDIMIENTO GENERAL de obtención de proteínas de interés médico a partir de hipercultivos de células de mamífero. Se trocea un tejido (*1* y *2*) y se trata con un enzima proteolítico (*3*), que produce la disgregación en células. Estas se sedimentan por centrifugación (*4*) y se siembran en un medio nutricio, donde proliferan hasta cubrir el suelo del recipiente de cultivo (*5*). Una vez en monocapa confluente, las células se desprenden del suelo del recipiente en presencia de un enzima; se siembran en varios recipientes para extender el cultivo (*6*). Se almacena una reserva de células congelada en nitrógeno líquido (*7*). Cuando se necesita, parte de las células se descongelan; se emprende un nuevo cultivo (*8*), que se amplía (*9*) hasta conseguir un número de células suficiente para sembrar un tanque mayor (*10*). Hay varios procedimientos de recogida de las proteínas buscadas. Se extraen las células y se purifican productos que han elaborado: antígenos de superficie de células tumorales (*a*), por ejemplo. Si se trata de un producto de secreción –como en el caso de anticuerpos monoclonales– se obtiene a partir del medio, que se bombea del tanque, permaneciendo las células en el cultivo (*b*). En algunos casos hay que atravesar una fase antes, la de inducción de la síntesis de la molécula buscada: así ocurre en el ejemplo del interferón (*c*).

mezcla se siembra en un medio de cultivo líquido apropiado, que normalmente contiene sales, glucosa, ciertos aminoácidos (subunidades de las proteínas) y suero sanguíneo (por lo general del cinco al 20 por ciento del volumen total del medio).

Se añade suero como fuente de ciertos componentes todavía por identificar, indispensables para el desarrollo y proliferación celular en un medio artificial. El suero, muy caro, determina, con mucho, la viabilidad económica de un sistema particular de cultivo. Las células en cultivo se ven privadas del complejo sistema de defensa inmune, por cuya razón suelen agregarse antibióticos para evitar infecciones. Debe vigilarse estrictamente el *p*H, la temperatura y el nivel de oxígeno y dióxido de carbono. El contenido salino se controla para mantener dentro de ciertos límites la presión osmótica del medio de cultivo y, así, conservar la integridad de la frágil membrana celular.

Aunque la mayoría de las células de mamífero deben fijarse a una superficie sólida, las de origen sanguíneo o de tejido linfático, con casi todas las tumorales y otras células transformadas, se pueden adaptar al cultivo en suspensión. Se cultivan en botellas de agitación: sencillos recipientes de vidrio en los que se suspende un elemento móvil, accionado por un agitador magnético externo situado en su base. Para aplicaciones de laboratorio se dispone de botellas de una gama amplia de volúmenes, desde los 25 mililitros hasta los 15 litros.

En el caso de células que necesiten fijarse (la mayoría de las normales) se nos ofrece un extenso abanico de posibilidades: desde micropocillos hasta tanques de distinto tamaño, pasando por placas de Petri. El más operativo de ellos es la botella rodante: un recipiente cilíndrico cuya generatriz se coloca horizontalmente para que gire. Las células se adhieren por sí mismas a la superficie interna del cilindro y la lenta rotación (aproximadamente una vuelta por minuto) permite el contacto sucesivo y alternado de las células con el medio líquido y el aire. Las botellas rodantes de mayor tamaño ofrecen una superficie útil de unos 1600 centímetros cuadrados (aproximadamente un cilindro con generatriz de 40 centímetros y diámetro de 13 centímetros. Nota del Traductor).

Para células capaces de proliferar en suspensión se han desarrollado tanques de hipercultivo, inspirándose en los clásicos fermentadores de microor-

ganismos unicelulares. Sin embargo, este proceso presenta ciertas deficiencias que no han podido superarse. La mayoría de los tanques derivados de fermentadores son complejos y caros. Para garantizar su asepsia dependen de un refinado equipo de esterilización por vapor y de la adición de antibióticos al medio. El hipercultivo de células que sólo proliferan fijas a una superficie presenta, si cabe, mayores dificultades, que, hasta un pasado muy reciente, se han venido superando por el sencillo método de incrementar el número de recipientes convencionales de cultivo: habitualmente botellas rodantes.

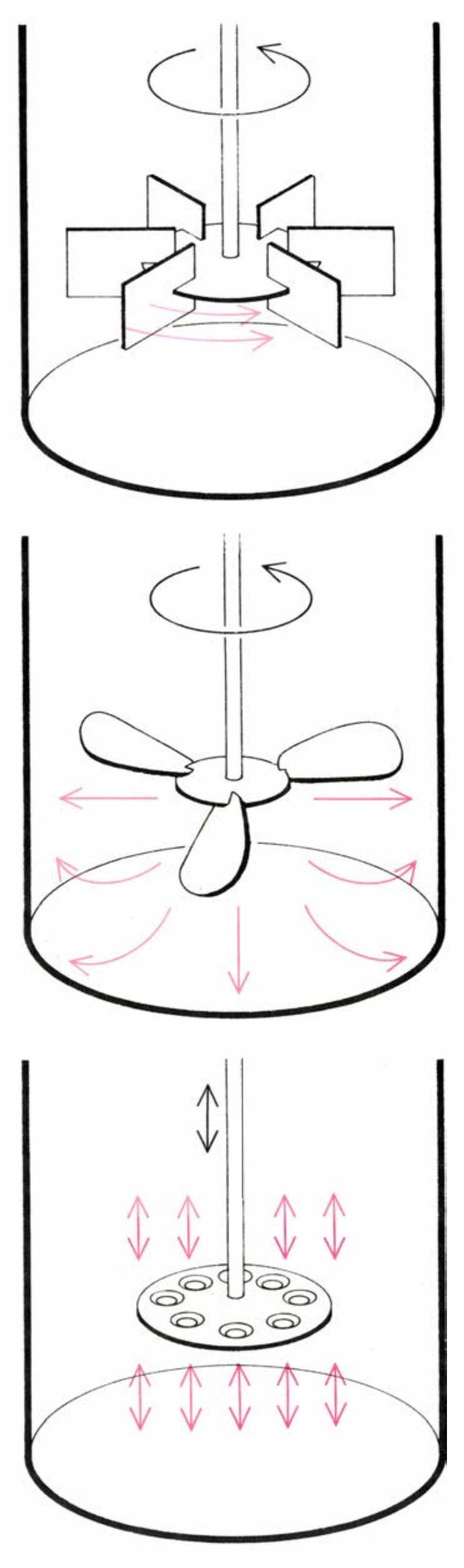
Años atrás, nuestro laboratorio del departamento de investigación, de la Compañía Monsanto, emprendió el diseño de nuevos sistemas de hipercultivo que satisficieran nuestra ineludible demanda semanal de cientos de litros de suspensión celular. Desde un principio optamos por sistemas que mantuviesen la esterilidad sin depender de antibióticos, ya que su presencia en el medio de cultivo puede encubrir, por algún tiempo, el lento desarrollo de una infección suave y afectar al metabolismo celular de un modo no siempre predecible. También optamos por una aproximación modular: los tanques de cultivo alcanzarían un tamaño limitado y la producción a gran escala se realizaría por acoplamiento en serie de más módulos iguales. Finalmente, nos vimos obligados a ensayar nuevos ingenios que contemplasen los requerimientos específicos de las grandes y frágiles células de mamífero.

Un sencillo y económico tanque para el cultivo de células en suspensión reunía todas estas condiciones. Se construyó a partir de un bidón de acero inoxidable de unos 110 litros, provisto de una tapa móvil a la que iban conectados todos los conductos de entrada y salida. El discreto tamaño del tanque facilitaba la esterilización en un autoclave; una doble esclusa, situada en la tapa, permitía la toma de muestras siempre que fuera necesario sin temor a contaminar el cultivo. La agitación –imprescindible– la proporcionaba un "vibromezclador" (el diseño inicial fue presentado en 1965 por George E. Moore, del Roswell Park Memorial Institute). Se trata de un disco con aberturas cónicas unido a un eje que sube y baja a gran velocidad. El movimiento del disco, unido al paso de medio por los orificios, proporciona una agitación preferentemente vertical. Una ventaja adicional del vibromezclador es que el movimiento se le transmite por medio de un diafragma flexible, lo que mantiene un absoluto aislamiento estático en la parte superior del tanque. En esa misma zona, se insertan unos conductos que sirven para burbujear oxígeno hasta la masa líquida y renovar el aire próximo a la superficie del medio, que va enriqueciéndose en dióxido de carbono.

Construimos varios tanques de 100 litros de ese tipo. Valían alrededor del 5 por ciento del fermentador convencional. Se trataba de un diseño adaptable a múltiples tipos celulares capaces de multiplicarse en suspensión; a lo largo de los últimos años hemos cultivado y cosechado centenares de miles de litros de suspensiones celulares, tanto humanas como de roedores. Sin embargo, en vez de construir versiones mayores del tanque de 100 litros, y así alcanzar superiores niveles de producción, empezamos a considerar un sistema que simulase más estrechamente las condiciones naturales en las que se desarrolla una célula de mamífero.

Un sistema convencional de cultivo de células, incluido nuestro tanque de 100 litros, somete a las unidades en crecimiento a un constante cambio de ambiente. Las células se siembran en un medio con los nutrientes apropiados y limpio de cualquier producto metabólico de desecho; a medida que las células se desarrollan y multiplican, y la concentración de nutrientes disminuye, aumenta la de productos de desecho. Esto limita la densidad del cultivo. Por contra, en el animal vivo, la norma es la homeostasis, el estado estacionario. Un eficaz sistema circulatorio suministra oxígeno y nutrientes y retira el dióxido de carbono y los productos de desecho, proporcionando a cada célula un ambiente constante, a pesar de que la densidad celular, en un tejido vivo, multiplique de 500 a 1000 veces la de un medio de cultivo usual. Sería deseable mantener las células en cultivo en una situación cercana al estado estacionario. Se logra con la renovación constante del medio, es decir, por inyección, o perfusión, continua de medio fresco al cultivo e incesante retirada del mismo, una vez agotados sus nutrientes. El problema estriba en retirar el medio sin arrastrar células con él. En 1969, Philip Himmelfarb y Philip S. Thayer, de Arthur D. Little, Inc., desarrollaron un sistema de perfusión, a escala experimental, para cultivo de células animales en suspensión, y anunciaron la obtención de densidades muy superiores a las que daban los sistemas convencionales de suspensión.

Hemos desarrollado un sistema de

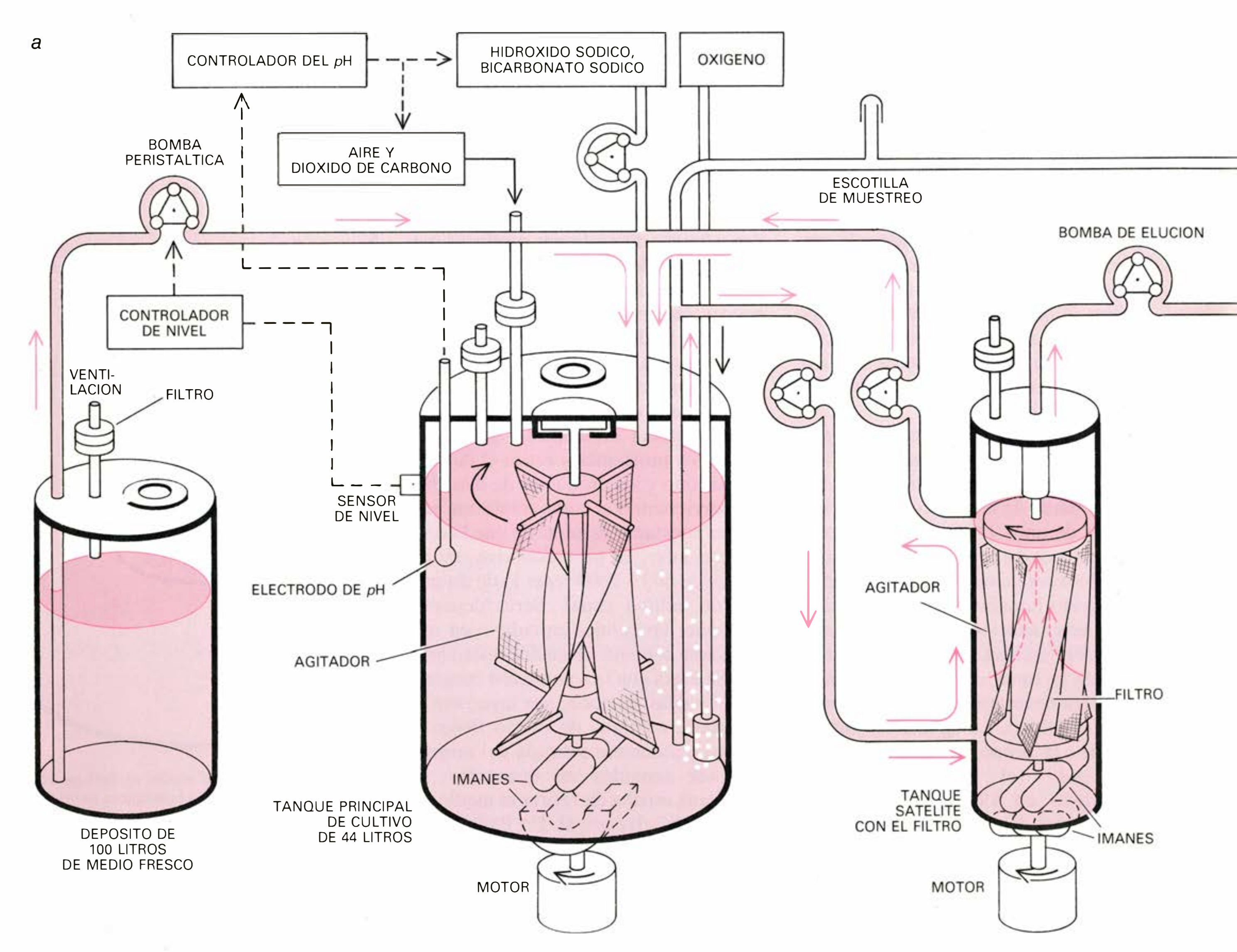


3. LA AGITACION del medio es indispensable para lograr una suspensión homogénea de las células y conseguir una distribución uniforme de los gases disueltos. El agitador de turbina (*arriba*), empleado en fermentadores para microorganismos, ofrece el inconveniente de su elevada velocidad de rotación, que provoca cizallamientos de fuerte componente horizontal que terminan por dañar las frágiles células de mamífero. Un agitador en forma de hélice propulsora (*centro*) suministra la agitación requerida, vertical y horizontal, sin la celeridad de rotación anterior. El "vibromezclador" (*abajo*) oscila de arriba abajo, favoreciendo la mezcla en sentido vertical y, por tanto, la aireación del medio, rebajando el riesgo de lesión.

perfusión a media escala, con tanques de 4 y 44 litros, que rinden cantidades de células en cultivo comparables a las obtenidas en tanques convencionales de 100 y 1000 litros, respectivamente. La realimentación se basa en la introducción en el sistema de un tanque satélite que contiene un filtro cilíndrico de porcelana con poros de diámetro inferior a los dos micrometros (milésimas de milímetro). El filtro retiene las células, que se devuelven, por bombeo, al tanque principal; una parte del medio se recicla y otra se retira, al tiempo que se inyecta medio fresco. Para reducir la obturación de los poros del filtro por células o restos celulares, se provocan fuerzas de cizalla en la superficie del mismo mediante la rotación del filtro o colocando a su alrededor un agitador giratorio. Sensores especiales, escotillas de muestreo y conductos de entrada y salida mantienen el *p*H y las concentraciones de oxígeno, dióxido de carbono y nutrientes al nivel adecuado, aun cuando las células se apiñen en densidades elevadas.

Los niveles de densidad celular alcanzados con la realimentación obligaron a diseñar otro mecanismo de agitación más suave. Cuatro láminas flexibles, tejidas con un monofilamento plástico, rotaban lentamente (de 8 a 20 revoluciones por minuto) en el tanque de cultivo, ondeando a modo de velas cuando el medio líquido rebosaba por su borde tractor. Al distribuir la energía de agitación requerida sobre un área mayor, el mecanismo de "lámina flexible" minimizaba la incidencia de las fuerzas de cizalla sobre cada célula.

Para evaluar la productividad del sistema de realimentación comparamos la tasa de crecimiento de una línea de células tumorales de ratón en el tanque de cultivo y ese mismo parámetro en un sistema convencional; seguimos la evolución de las concentraciones de glucosa y ácido láctico (el principal producto metabólico) en el medio eluyente. La tasa de crecimiento vino a converger en ambos sistemas, pero la densidad celular era considerablemente superior en el tanque de realimentación, unos 25 millones de células por mililitro frente a un millón de células por mililitro en el reactor convencional. A densidad máxima, en el tanque de realimentación todas las células seguían con vida, mientras que en el sistema convencional había muerto alrededor del 30 por ciento. Quizás importe más todavía, desde el punto de vista económico, saber que el rendimiento de células por unidad de volumen de medio consumido era más de 2,5 veces supe-



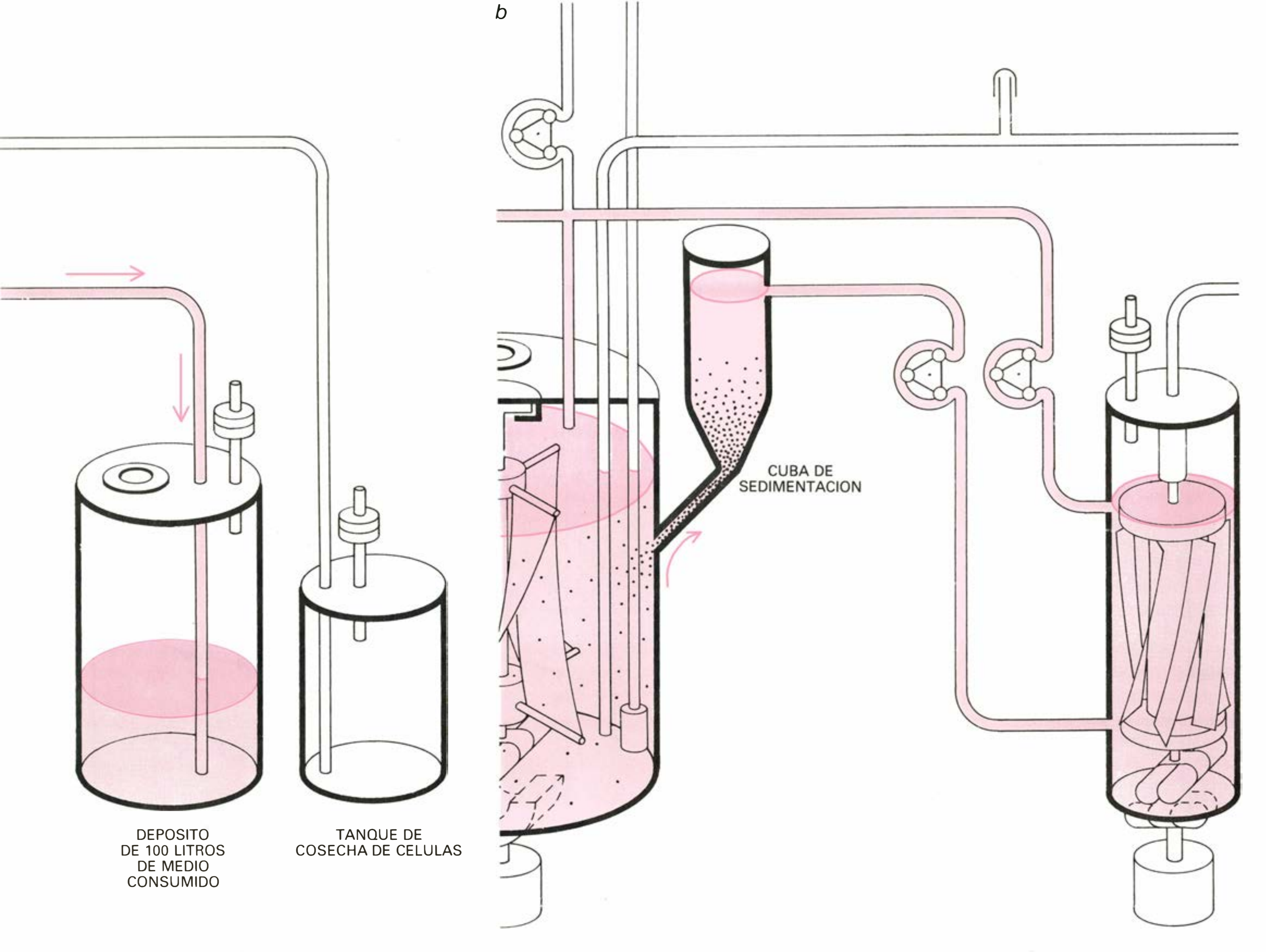
4. TANQUE DE PERFUSION diseñado por los autores. Los esquemas muestran la versión de tanque desarrollado para cultivo en suspensión (*a*) y una modificación introducida para células que proliferan en bolitas microscópicas denominadas microsoportes (*b*). En el tanque principal, la agitación corre a cargo de cuatro láminas flexibles tejidas con un monofilamento de nylon, que rotan lentamente (de 8 a 20 rpm). Desde allí, se bombea continuamente medio hasta el tanque satélite, donde parte del medio se expulsa, a través de un filtro de porcelana, hasta el tanque de elución. El filtro retiene las células, que se devuelven, junto con el resto del medio, al tanque principal, para proseguir su proceso de proliferación. Una versión reducida del agitador mencionado se

rior en el sistema de realimentación (a pesar de que en éste el medio se renueva continuamente). Descubrimos, por si fuera poco lo anterior, que el tanque podía operar en el llamado modo "quimiostático", en el cual, parte de las células se extraen con el medio ya consumido, manteniéndose la densidad celular al nivel óptimo.

La mayoría de las células normales de mamífero sólo se multiplican si están fijas a la superficie del tanque de cultivo, dijimos antes. Las botellas rodantes y otros recipientes de cultivo no proporcionan una relación área-volumen suficientemente grande para el hipercultivo. Hay varias estratagemas para potenciar esta relación. Así, las células pueden cultivarse sobre superficies de polímeros esponjosos, en ordenaciones de finos túbulos o fibras huecas, en apilamientos de placas delgadas o en diminutas bolas llamadas "microsoportes". Nuestra investigación se centró en la fibra hueca y el microsoporte.

Estudios realizados en nuestro laboratorio y por Richard A. Knazek y sus colaboradores, del estadounidense Instituto Nacional del Cáncer, demostraban que las células de mamífero podían cultivarse en tipos muy distintos de fibras huecas con un diámetro externo comprendido entre 0,3 y 0,75 milímetros. Las fibras, porosas, posibilitan que el aire que las atraviesa difunda hasta las células de la superficie externa, bañada por el medio. Después de estudiar varias configuraciones nos decidimos por una ordenación de las fibras en "capa fina". El núcleo del sistema lo constituye un lecho muy fino de fibras, de 3 a 6 capas, al que se fijan y donde proliferan las células.

El medio fresco entra en el cuerpo metálico por debajo del lecho de fibras y avanza hacia arriba, a través del mismo, hasta que se recoge por la parte superior. Para lograr un flujo uniforme y perpendicular al plano del lecho, se bombea el medio en sentido vertical, haciéndolo pasar por un filtro de microporos: una lámina de acero con poros de dos micrometros de diámetro. Otro filtro de poros de 20 micrometros de diámetro se sitúa por encima del lecho para reducir la intensidad del flujo descendente. La ventaja de la configuración en "capa fina" reside en la brevedad del trayecto de realimentación, si lo comparamos con el del sistema del haz cilíndrico, donde el flujo de medio es paralelo al eje de las fibras. Esto bloquea la formación de un gradiente de concentración de nutrientes (alta en el comienzo y baja en el final del trayec-



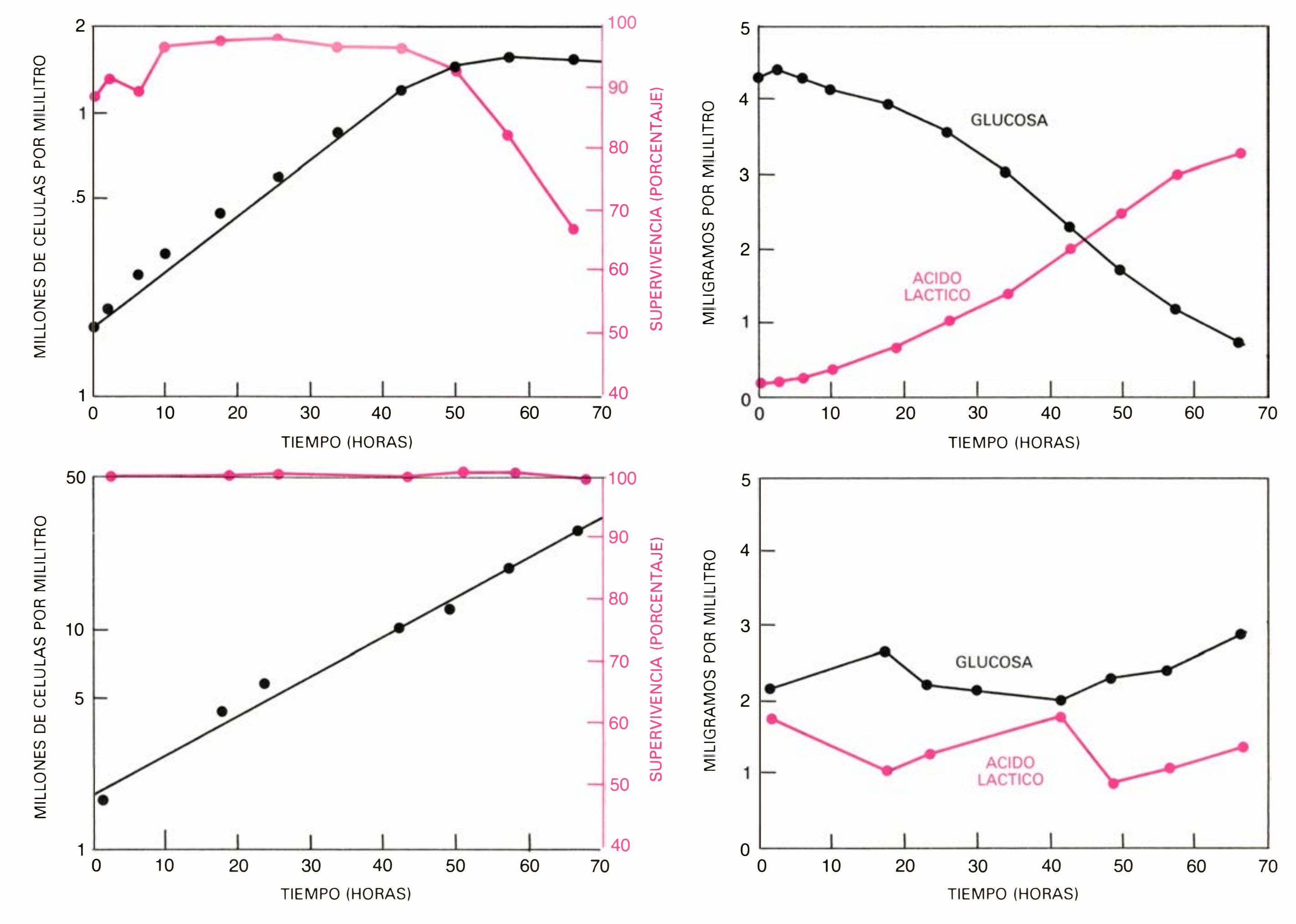
instaló en el tanque satélite con la intención de minimizar la obturación de los poros del filtro. Las sustancias secretadas por las células pueden recobrarse del medio del tanque de elución. También pueden recuperarse por extracción del tanque principal y transporte hasta el tanque de cosecha de células. La mayoría de las células normales de mamífero sólo proliferan cuando están adheridas a una superficie; las bolitas microsoporte cumplen aquí esa función. Para adaptar el tanque de realimentación al cultivo de células en microsoporte se incluyó una cuba de sedimentación entre el tanque principal y el satélite. Las bolitas, tapizadas de células, sedimentan formando un fluido denso que resbala hacia el tanque principal, donde seguirán multiplicándose.

to) o de productos de desecho (en sentido opuesto al de nutrientes); todas las células están expuestas a medio fundamentalmente fresco. Los extremos de las fibras se embuten juntos en un material no tóxico y elástico, de modo que el orificio de cada fibra quede expuesto a las cámaras, desde donde se hace circular aire y dióxido de carbono.

Construimos dos reactores prototipo, con superficies fibrilares de 930 y 9300 centímetros cuadrados (el mayor mide 40 centímetros cuadrados de base por 4,5 centímetros de alto) que han mantenido cultivos a elevada densidad durante mucho tiempo. Así, el prototipo menor mantuvo cultivos de células de pulmón humano a una densidad aproximada de un millón de células por centímetro cuadrado, vale decir, una densidad 10 veces superior a la que se logra en botellas rodantes. La perfusión del medio se muestra muy eficaz en estos tanques, y puede regularse para mantener constantes los niveles de nutrientes y productos de desecho a medida que proliferan las células. Lo que se logra evaluando la concentración de ácido láctico en el medio ya usado y estimando, a partir de ese dato, cuántas células hay en las fibras, con objeto de adecuar la intensidad del flujo de medio fresco.

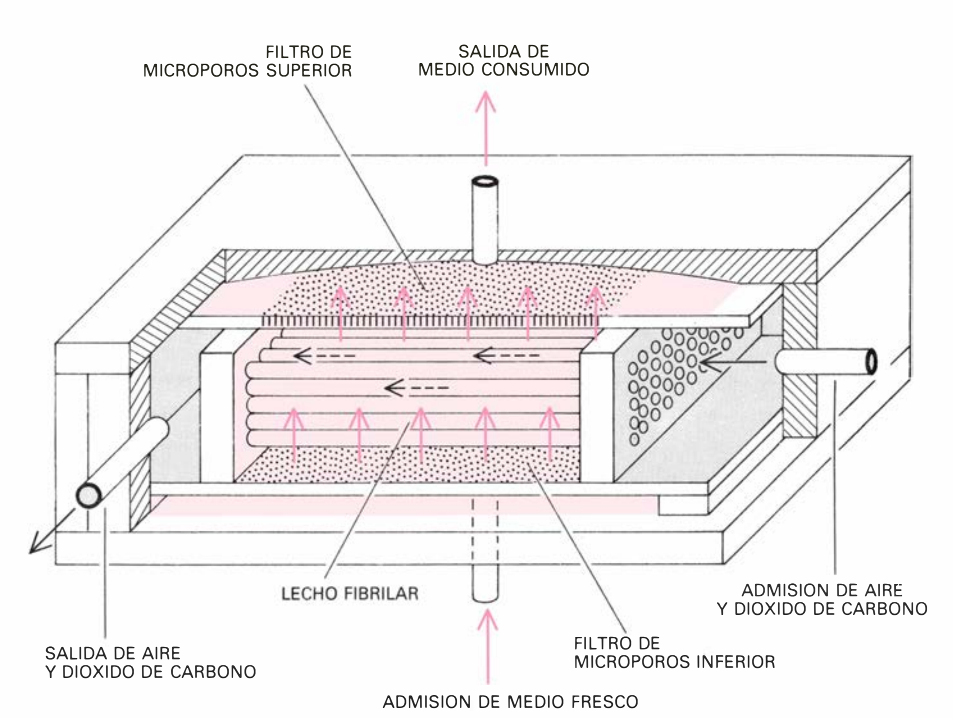
El sistema no se limita a rendir un elevado número de células. De hecho, fabrica un tejido artificial, ya que miles de millones de células se dividen hasta tapizar por completo las fibras, e incluso penetrar en ellas. Se pueden mantener durante mucho tiempo (entre 21 y 59 días en nuestros experimentos) enormes cantidades de células en condiciones de tensión mínima. A lo largo de esos períodos, se producen y recuperan del medio ininterrumpidamente moléculas tan importantes como la uroquinasa o el factor angiogénico. Un delicado control de contaminación debería posibilitar el uso casi ilimitado de estos sistemas. Conseguido el crecimiento máximo, se sustituye, si es factible, el caro medio inicial por otro de bajo o nulo contenido en suero, que permite, no obstante, mantener la producción de la molécula deseada.

Anton L. van Wezel, del Instituto Nacional para la Salud Pública de Holanda, presentó, en 1967, el método del microsoporte. Desde entonces se han venido estudiando y aplicando a la producción industrial a media escala numerosas variaciones del diseño original. Las bolitas-microsoporte están hechas de dextrano (un polímero natural de la glucosa) o de cualquier otro polímero sintético; su diámetro oscila entre 50 y algunos centenares de micrometros. Se siembran las células en un medio donde se hallan suspendidas las bolitas-microsoporte; se unen a ellas y se multiplican. El adelanto que supone el



5. PRODUCTIVIDAD del sistema de perfusión, o realimentación. Queda patente al comparar entre la cinética de crecimiento celular (*izquierda*) y de consumo de medio (*derecha*) en una botella de agitación convencional (*arriba*) y el mismo parámetro en un tanque de perfusión de cuatro litros (*abajo*). Células de tumor de rata, que proliferan bien en suspensión, mantuvieron tasas de multiplicación comparables en ambos sistemas, pero alcanzaron una densidad final muy superior en el de realimentación (*curvas negras de la izquierda*) y conservaron su tasa de supervivencia incluso a una extrema concentración celular (*curvas de color de la izquierda*). Los niveles de glucosa y ácido lactico reflejan el consumo de nutrientes y el enriquecimiento del medio en productos de desecho durante el desarrollo del cultivo. Ambas curvas –la de concentración de glucosa y la de ácido láctico– mostraron una evolución uniforme, y de sentido contrario, en la botella de agitación, mientras que se mantuvieron prácticamente constantes en el tanque de realimentación.

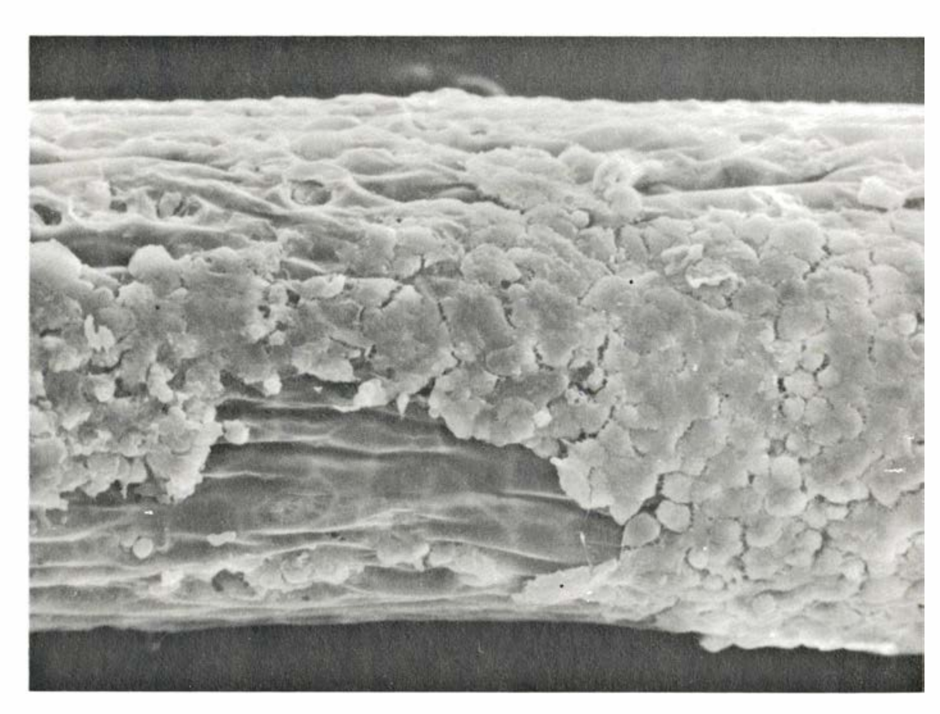
microsoporte estriba en que, aun cuando las células estén fijas a una superficie, las bolitas que la proporcionan quedarán suspendidas en el medio; las células pueden así cultivarse en tanques de suspensión convencionales. Sin embargo, estos sistemas no son muy eficaces en el cultivo en microsoportes: a la preocupación normal por el control de nivel de nutrientes y productos de desecho, se añade el control sobre la cantidad y distribución de las bolitas-microsoporte. Dado que las colisiones entre las bolitas pueden lesionar las células, se requiere un mecanismo de agitación suave que no destruya demasiadas células y mantenga en suspensión las bolitas. Para cultivar grandes cantidades de células se necesita una superficie extensa; ello implica una gran concentración de bolitas y, por tanto, mayor frecuencia de colisión entre las mismas. La relación superficie/volumen, relativamente alta, alcanzada por las bolitas-microsoporte conlleva otro problema: al proliferar exponencialmente las células, puede haber un rápido consumo de nutrientes acompañado de un brusco enriquecimiento en desechos metabólicos. Nos resta, por último, el problema del paso de un tanque de cultivo a otro mayor. Las células incrustadas se desprenden de su soporte y tornan a suspenderse en un tanque mayor con una nueva dosis de bolitas, pero la experiencia con sistemas convencionales de microsoporte indica que es muy difícil desprender las células sin dañar un buen número de ellas.



6. TANQUE DE LECHO FIBRILAR. En este reactor de perfusión se cultivan las células en un lecho de fibras plásticas, porosas, de 0,3 milímetros de diámetro. Los extremos de las fibras quedan expuestos al suministro de aire y dióxido de carbono (*flechas negras*). El exterior de las fibras está bañado en un medio de cultivo, cuyo flujo (*flechas de color*) se mantiene uniforme gracias a dos filtros de microporos. Las células sembradas en el tanque se adhieren a la superficie de las fibras y se dividen continuamente, formando un verdadero tejido artificial que persiste meses enteros. (Ilustración de Jerome Kuhl.)

Adaptamos el sistema de realimentación al manejo de microsoportes y vimos que permitía un importante incremento de la densidad celular. Los agitadores de lámina flexible proporcionaban la imprescindible agitación suave. Girando sólo de 8 a 20 revoluciones por minuto se alcanzaba una elevada concentración de bolitas en suspensión (hasta 12 gramos de bolitas por litro de medio) sin lesionar las células. La principal modificación fue la inclusión de una cuba de sedimentación entre el tanque principal y el tanque satélite donde se alojaba el filtro. La bomba de reciclaje transporta el medio y sus bolitas tapizadas de células hasta el tanque satélite. Ya en la cuba de sedimentación, lejos de la zona donde el medio se agita, las bolitas sedimentan y se agregan formando una densa "papilla" grumosa que resbala hacia el tanque principal; el medio, que queda esencialmente limpio de bolitas, alcanza el tanque satélite con el filtro, a partir del cual se recicla o se retira del sistema.

En el proceso de sedimentación, las bolitas y sus células entran en estrecho contacto y siguen alimentándose con medio fresco del tanque principal. Las células tienden puentes de una bolita a otra, creando grandes acúmulos de bolitas y células. Así resulta que puede cuadruplicarse el número de células a obtener en una superficie de microsoportes dada. Otra ventaja, con la que no se contaba, se deriva de esa misma situación de elevada agregación: la se-



7. CELULAS CANCEROSAS HUMANAS (células HeLa), medrando sobre la superficie de una de las fibras huecas, según se aprecia en esta micrografía de barrido. Además de cubrir la superficie completa de la fibra, las células pueden penetrar en su estructura. La ampliación es aquí de 250 diámetros.

paración de células y bolitas se facilita resolviendo el problema del escalamiento hacia mayores tanques. En el transcurso de la agregación la adhesión de las células a su soporte se reduce en favor del fortalecimiento de las uniones célula-célula. Cuando se recupera del tanque el agregado de células y esférulas, un ligero tratamiento con el enzima tripsina separa, en buen estado, las células de sus soportes.

El tanque de microsoportes y realimentación ha demostrado su operatividad como sistema de hipercultivo para células que sólo proliferan fijas a una superficie. Las bolitas-microsoporte siempre han proporcionado un área útil potencial muy grande, pero ahora ya se puede explotar esa extensión entera (y superexplotar, si atendemos al efecto de emisión de puentes celulares entre bolitas), ya que la realimentación mantiene un ambiente óptimo para cada célula, incluso a densidades celulares altísimas (en este sistema se alcanzan densidades entre 5 y 10 veces superiores a las anteriores).

La combinación del cultivo celular a alta densidad y de un eficaz escalamiento conduce a resultados espectaculares. En una operación experimental de un pequeño tanque de microsoportes y realimentación de 4 litros cultivamos 40.000 millones de fibroblastos humanos: el equivalente a una cosecha normal de 1300 botellas rodantes. Estas células se desprendieron de sus soportes y se sembraron, a su vez, en un tanque de 44 litros junto con 400 gramos de microsoportes nuevos, que suponen un área de 188 metros cuadrados. Se obtuvieron 340.000 millones de células; un volumen que, de otro modo, hubiese empleado 11.000 botellas rodantes. Los fibroblastos cosechados se utilizaron para producir interferón, uroquinasa y factor angiogénico. La medida óptima de la relación producción-costo de un sistema es el rendimiento de células por litro de medio consumido. En todos nuestros experimentos, éste ha sido unas cuatro veces superior al obtenido con sistemas de botella rodante.

Crece la demanda de sistemas rentables de hipercultivo sin antibióticos para una amplia gama de células de mamífero, que satisfagan las necesidades de laboratorios de investigación y la producción a escala comercial. Parece claro que esta moderna y eficaz técnica puede ampliar el conocimiento de procesos biológicos y proporcionar notables cantidades de productos celulares que prometen ser valiosos agentes terapéuticos.

Máquinas que caminan

El microprocesador permite controlar máquinas que poseen patas. Los experimentos realizados con tales ingenios nos han traído un mejor conocimiento de la dinámica de la marcha animal

Marc H. Raibert e Ivan E. Sutherland

La máquina imita la naturaleza. El avión, por ejemplo, recuerda el planeo de los pájaros. Una de las formas de locomoción animal que se ha resistido a la imitación es el caminar ¿Podemos acoplar los modernos ordenadores y los sistemas de control por realimentación para construir artilugios que caminen? Dispuestos a resolver ese reto hemos estudiado y ensayado distintos modelos que se fundaban en el ordenador y aprovechaban la tecnología electrónica actual.

Hemos construido dos máquinas. Una de ellas tiene seis patas y la conduce una persona; su finalidad es la de permitirnos investigar el tipo de locomoción de los insectos, que no requiere ninguna atención al problema del equilibrio. La otra máquina posee una única pata y se mueve dando saltos; nos va a servir para estudiar los problemas del equilibrio. Llamamos al primer tipo de locomoción reptar, para distinguirlo del caminar, que requiere equilibrio, y del correr, que supone además pequeños períodos de vuelo. Reconstruyendo nuestro trabajo entenderemos cómo caminan, corren y reptan las personas y los animales.

A diferencia de la rueda, cuyo punto de contacto con el suelo cambia continuamente y de forma gradual mientras soporta una carga, la pata modifica su punto de apoyo en cada momento y hay que liberarla de su carga para que pueda realizar dicha acción. Si queremos que un sistema provisto de patas repte, camine o corra, cada una de ellas deberá atravesar períodos en los que soportará carga y mantendrá su pie fijo en el suelo y otros en los que se le liberará de la carga para que su pie se mueva libremente. Este tipo de cambios cíclicos entre una fase con carga, o de reposo, y otra fase sin carga, o fase de transferencia, se encuentra en cualquier forma de sistema con patas. Como conocen los que han ido al trote o al galope en un caballo, la alternancia entre estas dos fases genera un movimiento acusado de arriba abajo. Nosotros creemos que pueden construirse máquinas con patas que minimicen este tipo de efecto.

Sería bueno que este trabajo y otros afines instaran el desarrollo de máquinas que repten, caminen y corran en terrenos donde, por sus características peculiares, se les cierre el paso a los vehículos con ruedas o con tracción de oruga. Dichas máquinas pueden ser de utilidad en aplicaciones industriales, agrarias y militares. La ventaja de los vehículos con patas en estos terrenos difíciles reside en que pueden escoger el lugar de apoyo adecuado para mejorar la tracción, minimizar el balanceo y salvar los obstáculos. En principio, el funcionamiento de tales vehículos puede ser, en gran medida, independiente de la rugosidad del terreno. Hemos centrado nuestro estudio en las tareas de cálculo necesarias para el control y la coordinación del movimiento de las patas. Es inmediato que un componente importante en las máquinas que puedan reptar, caminar o correr sin brusquedades lo constituyen los refinados programas de control.

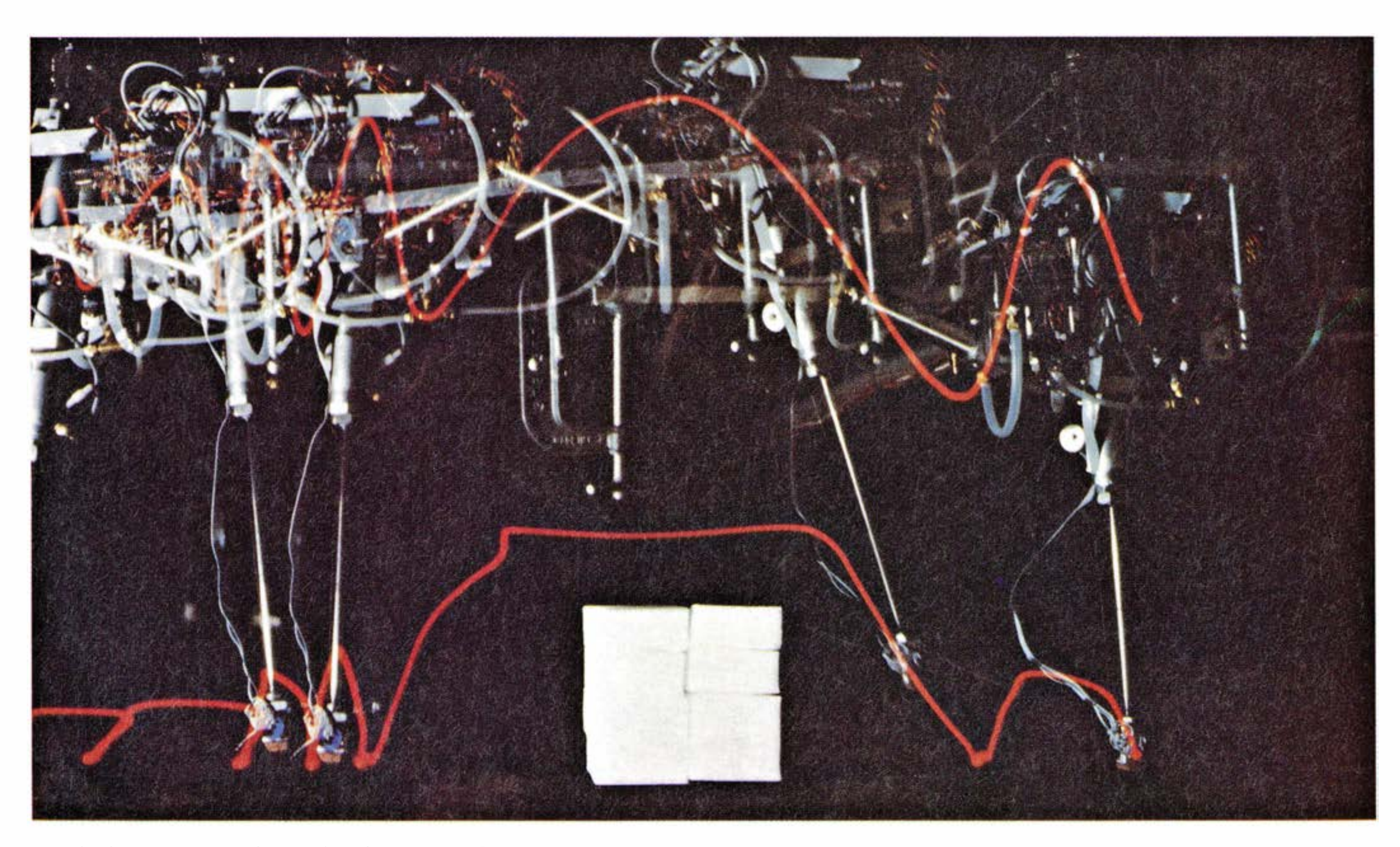
Hemos indicado ya que la locomoción es posible con o sin equilibrio dinámico. Los animales que reptan salvan la necesidad del equilibrio al tener un mínimo de seis patas, de las cuales, al menos tres, pueden utilizar a modo de trípode para mantenerse en pie. Imágenes de insectos en movimiento proyectadas a cámara lenta muestran que éstos se desplazan habitualmente reptando de forma que mantienen siempre en el suelo tres patas, formando un trípode, al tiempo que mueven las otras tres.

Aunque pueda construirse con cuatro patas una máquina que repte y que, por tanto, no necesite equilibrio dinámico, su funcionamiento no sería del todo satisfactorio: habría que desplazar su carga en cada paso para evitar que el ingenio se desplomara. Si se desea mejorar el funcionamiento sin preocuparse del equilibrio activo, deben aplicarse seis patas, número mínimo de patas que provee un soporte trípode, aun cuando la mitad se encuentren en el aire. Se han construido diversas máquinas de distintos tamaños y de diseños mecánicos diferentes que poseen seis patas controladas, todas ellas, por un ordenador.

Un programa de ordenador que controle una máquina de este tipo debe realizar cinco tareas. La primera consiste en regular el modo de caminar, es decir, la secuencia y la forma en que las patas comparten la acción de locomoción. Las máquinas con seis patas elevan una de ellas cada vez, o bien dos o tres simultáneamente.

Las formas más simples de caminar se consiguen con una secuencia regular de movimientos de las patas. La nueva secuencia sirve para descubrir un tipo de marcha. Así, la marcha consistente en mantener tres patas en trípode apoyado en el suelo puede expresarse como (1,5,3;6,4,2;), donde las comas señalan el uso concurrente de patas y el punto y coma el uso secuencial. De forma similar, marchas en las que se eleva una sola pata, tales como (3;2;1;4;5;6;) y (3;4;2;5;1;6;), también son de utilidad. Un tipo de paso que suponga alzar del suelo varias patas a la vez generalmente permite avanzar más deprisa, pero ofrece menos estabilidad que otra en la que se obligue mantener fijas en el suelo a un número mayor de patas.

Una segunda tarea del programa de ordenador que controla la máquina que repta es la de evitar que ésta se caiga. Si su centro de gravedad se desplaza fuera de la base de soporte que crean las patas, la máquina se vendrá abajo. El ordenador ha de saber en cada instante la localización del centro de gravedad de la máquina y del desplazamiento de los pies, para asegurarse de que la base soporte sea suficientemente grande. En



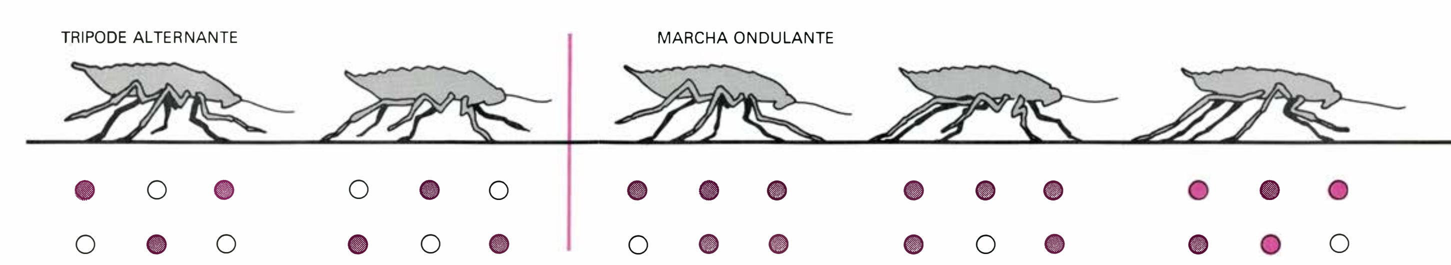
2. MODO DE SALVAR OBSTACULOS: la máquina saltarina, construida por uno de los autores, muestra cómo saltar sobre uno. Comienza aproximándose al obstáculo por la derecha; cuando la distancia que le separa es de un paso, el operador pulsa un botón. Se genera luego la máxima tensión en el actuador para aumentar la altura del salto siguiente. Durante el vuelo, se acorta la pata y se retarda su movimiento normal de oscilación para facilitar el paso sobre el obstáculo. Un servomecanismo que controla el equilibrio mueve la pata para darle el ángulo adecuado de aterrizaje; la pata se alarga preparándose para la toma de contacto con el suelo. Una vez en éste, la máquina continúa sus saltos normales. El obstáculo era de unos 15 centímetros de alto.

los casos sencillos, la geometría de las patas basta para mantener una base soporte adecuada. Si se aumenta la complejidad de la forma de caminar, el cálculo cuidadoso de la estabilidad estática puede convertirse en cuestión crítica.

Puesto que son muchas las patas que sustentan la máquina, una tercera tarea del ordenador de control consistirá en distribuir la carga soportada y las fuerzas laterales entre todas ellas. Cuando se camina formando un trípode, la distribución de carga, como es obvio, viene fijada por la geometría de las tres patas que soportan la carga en cada momento. Pero si son más de tres las que realizan esta función, compete al ordenador de control decidir cómo repartir las cargas para conseguir unos mejores objetivos, en cuanto al funcionamiento se refiere, tales como suavidad en la conducción y mínimo deterioro del terreno que pisa.

Aunque sólo sean tres las patas que en cada momento soporten la máquina, el programa de control distribuirá las fuerzas laterales del pie. Para abordar este problema, podemos considerar, por ejemplo, que el sistema de control debe evitar que la máquina realice simples ejercicios isométricos sobre el suelo. La cantidad de sensores y de cálculos que se necesita para distribuir las cargas laterales entre muchas patas puede resultar enorme. Nosotros hemos reducido este inconveniente en la máquina reptadora que estamos construyendo utilizando circuitos hidráulicos pasivos que distribuyen automáticamente las cargas laterales.

Una cuarta tarea del ordenador de control es la de evitar que las patas trasciendan los límites de sus recorridos permitidos. La geometría de una pata puede facilitar un eventual choque con otra; si las patas pueden colisionar, el



3. ASI ANDAN LOS INSECTOS. Sus pasos sirven de modelo para diseñar la locomoción de la máquina reptadora de seis patas. Los círculos subyacentes a cada dibujo indican si la pata correspondiente se encuentra en el suelo o en el aire: un círculo coloreado representa una pata que toca el suelo; el que está en

PASO

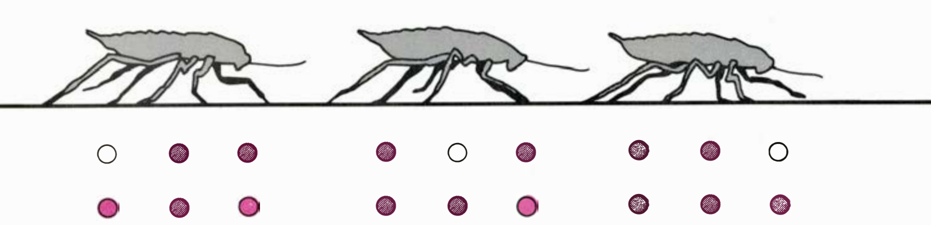
TROTE

GALOPE

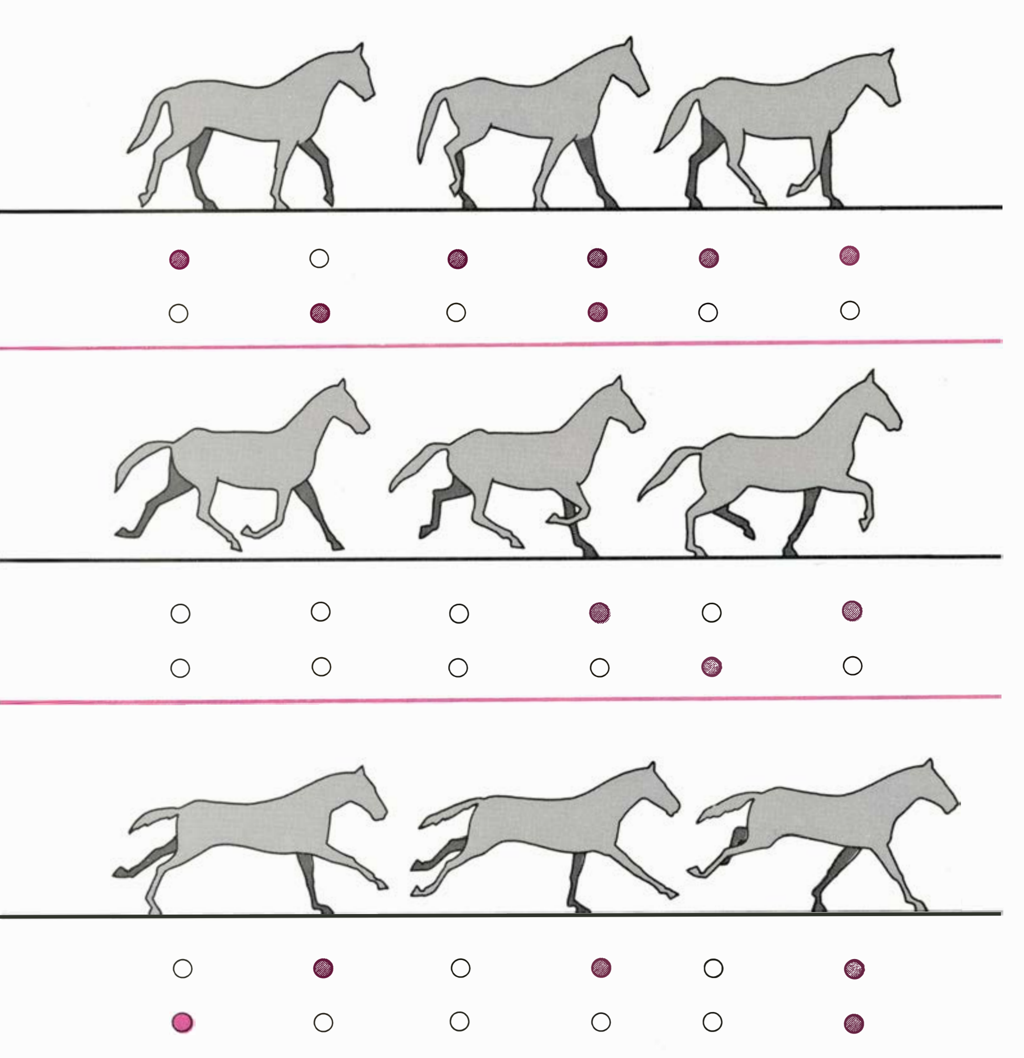
4. ASI SE MUEVE EL CABALLO. Nos ofrece el tipo de locomoción en el que el equilibrio constituye un factor importante. Cuando camina, el caballo tiene al menos dos de sus patas tocando el suelo permanentemente. Al trote y al galope el animal deja periódicamente el suelo. Los dibujos se basan en las

ordenador limitará sus movimientos y evitará su deterioro. Para maximizar la utilidad de cada pata, la posición que ocupa en el suelo debe tener en cuenta los límites de su propia trayectoria y el movimiento esperado de la máquina durante su período de reposo. Por ejemplo, si la máquina va a girar a la derecha, las patas delanteras se situarán un poco más distantes en esa dirección para que puedan adaptarse al movimiento lateral que van a desarrollar durante el giro. En la hipótesis de un vehículo con control autónomo, el lugar de asentamiento de las patas dependerá de la trayectoria planeada. Si el vehículo lo conduce una persona, el lugar adecuado de apoyo de cada pata exigirá predecir las órdenes del conductor durante el siguiente período de reposo de cada una de ellas.

Quinta tarea del programa de control: elegir los lugares de asentamiento más adecuados que favorezcan un mejor soporte de la máquina. En terrenos lisos, la tarea es fácil, pero en terrenos escabrosos puede encerrar suma dificultad. Todavía no se ha construido ningún sistema que realice esta función. Uno posible que entra en el ámbito de lo verosímil analizaría, por medio de barridos ópticos, las irregularidades del suelo por donde evolucione la máquina y eligiría los lugares de apoyo más adecuados para los pies. El ordenador haría uso de tal sistema de barrido creando un modelo digital interno del suelo. Tal modelo tendría en cuenta las irregularidades que fueran de un tamaño igual o mayor que el de los pies de la máquina.



blanco, una pata en el aire. La forma de andar mediante alternancia de soportes trípodes proporciona siempre estabilidad. Para deslizarse como una ola, las patas adyacentes se mueven de forma sucesiva.



fotografías que hizo Eadweard Muybridge hace cien años y que acabaron con el debate sobre si un caballo al trote tenía en algún momento todas sus patas en el aire. Otros animales hacen lo mismo al correr.

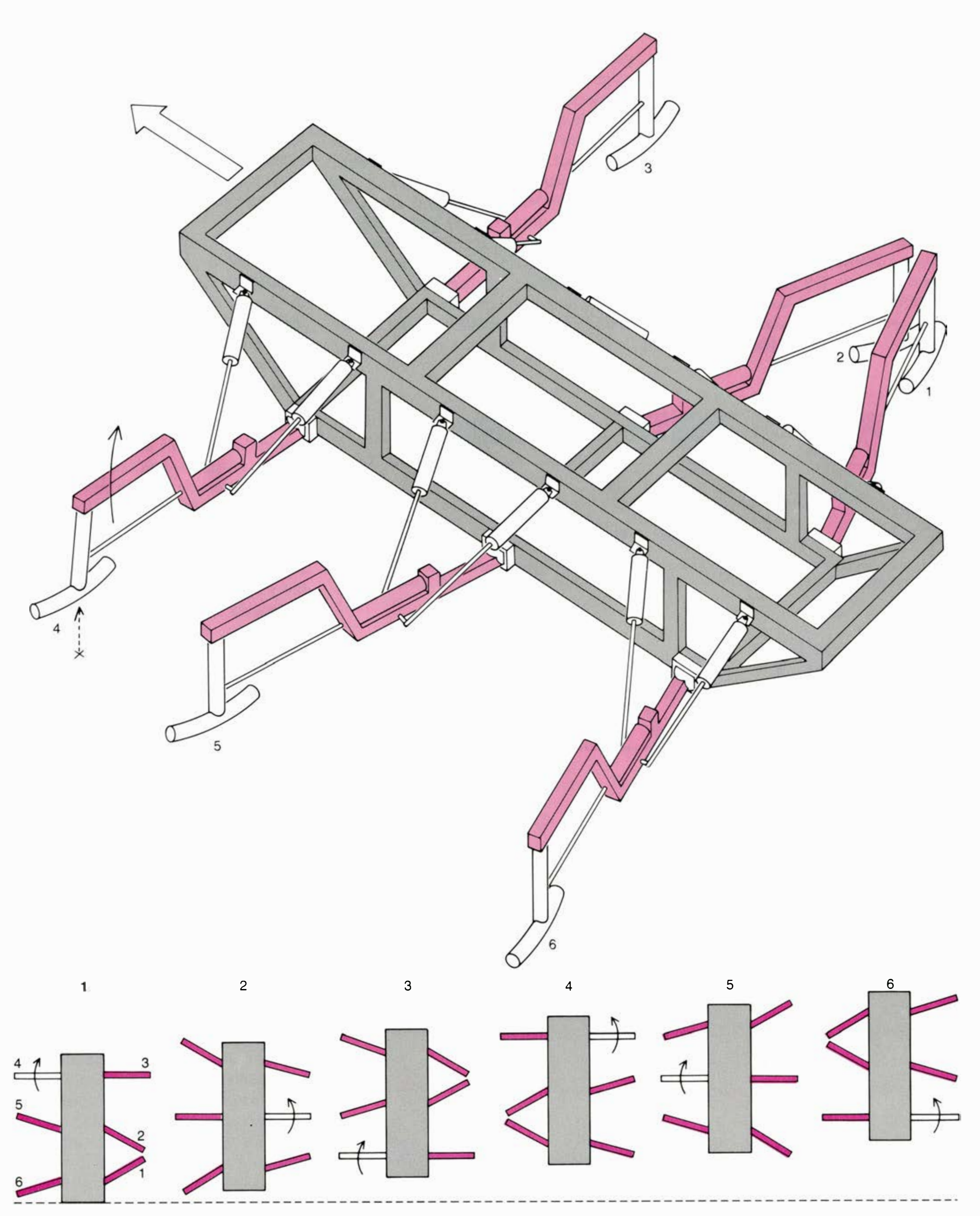
Uno de los autores (Sutherland) está construyendo una máquina reptante hidráulica de seis patas. Un motor de gasolina suministra la potencia necesaria a los actuadores hidráulicos de las patas. Al tener seis, no hace falta considerar el equilibrio dinámico.

La máquina lleva incorporado un microprocesador que controla la abertura y cierre de las válvulas que regulan el flujo de aceite a los actuadores hidráulicos de las patas. Los sensores acoplados a cada una de éstas le indican al microprocesador la posición y las fuerzas que actúan sobre cada pata. La magnitud de la máquina permite el acomodo de una persona que controla la velocidad y dirección del movimiento, fija la inclinación del cuerpo del aparato y su altura sobre el suelo. La velocidad de diseño es de unos tres kilómetros por hora.

El proyecto se proponía también minimizar los cálculos requeridos para llegar al movimiento de reptación. Los circuitos hidráulicos se diseñaron para que las patas se movieran dentro de trayectorias útiles, sin necesitar atención por parte del microprocesador, que simplemente selecciona una de las posibles trayectorias para cada pata. De esta forma, el microprocesador esta más libre para concentrarse en determinar qué patas deben ser las sustentadoras y decidir dónde dar el paso siguiente; no tiene que perder tiempo en calcular detalles del movimiento de cada pata.

Gracias a una articulación universal sujeta al chasis de la máquina, que llamaremos cadera, las patas pueden moverse adelante y atrás y arriba y abajo. La forma de llevarlo a cabo consiste en alargar o acortar los dos actuadores hidráulicos colocados en una configuración en *V*, encima de cada una de las patas. La abertura de las válvulas permite que el aceite salga de un actuador y fluya hacia el otro, de forma que mientras el primero se acorta, el segundo se alarga en la misma cantidad. Gracias a la geometría del diseño se consigue el desplazamiento horizontal de la pata.

Que este movimiento horizontal se facilite o impida depende de la posición



5. MAQUINA DE SEIS PATAS construida por uno de los autores del artículo (Ivan E. Sutherland). Avanza reptando. No necesita preocuparse del equilibrio. Las seis patas están controladas por un microordenador que lleva incorporado consigo. Un motor de gasolina de 18 caballos de vapor aporta la potencia necesaria para accionar sendas bombas hidráulicas asociadas a las patas de cada lado. Una persona dirige la máquina haciendo fluir el aceite a diferentes velocidades en ambos lados. Unos sensores dan cuenta al microordenador de las acciones del conductor, de las posiciones de cada pata y de las fuerzas sobre las mismas; el computador utiliza esta información para elegir el orden de actuación de cada pata y su trayectoria. Las seis extremidades aseguran la estabilidad, ya que al menos tres de ellas se encuentran siempre firmes en el suelo. Unos circuitos hidráulicos pasivos simplifican la tarea de cálculo; una pata que soporta peso puede o bien conectarse a la unidad motriz o bien dejarse muerta, siendo empujada entonces por el suelo de acuerdo con el movimiento generado por las otras patas. El diagrama secuencial de la parte inferior indica la posición de las patas durante un ciclo de movimiento que puede definirse como (4;2;6;3;5;1;). Un rectángulo coloreado representa una pata que toca el suelo; un rectángulo blanco, otra en movimiento de avance en la dirección que indican las flechas. En la representación numérica del ciclo, el punto y coma denota el uso secuencial de las seis patas.

de las válvulas; lo que permite utilizar algunas patas para conducir la máquina y dejar el resto muertas. En el momento en que las patas tocan el suelo y aceptan carga, se las deja a merced de las que ya estaban en el suelo y que eran en ese momento las conductoras. Por tanto, el ordenador de control no necesita calcular el preciso instante en que una pata toca el suelo ni los detalles del movimiento que hay que tener en cuenta en el instante de contacto para evitar brusquedades en el avance.

La articulación de la rodilla de cada pata tiene acoplado otro actuador hidráulico montado horizontalmente a lo largo de la pata. Este actuador puede activarse mientras la pata se eleva para colocar el pie lateralmente en el paso inmediato. Con el pie en el suelo, la articulación de la rodilla debe moverse ligeramente para que la trayectoria circular de la rodilla sobre la cadera se acople a la trayectoria rectilínea del pie sobre el suelo. El movimiento es complejo, pero no precisa la intervención del ordenador; es más, una simple conexión en paralelo de todos los actuadores de las rodillas permite a éstas acomodarse al movimiento medio del vehículo. Una bomba hidráulica adicional, incorporada en el sistema, obliga que las articulaciones de las rodillas realicen un movimiento transversal colectivo; de esta manera se consigue que la máquina repte lateralmente como si de un cangrejo se tratara.

La persona que conduce la máquina dispone de tres tipos de control. En primer lugar, puede regular la cantidad de aceite que fluye por los circuitos hidráulicos del sistema, puesto que tiene la posibilidad de controlar el desplazamiento de las bombas hidráulicas. Las patas del lado derecho poseen una bomba distinta de las del izquierdo para que el conductor, mediante el correspondiente mando, inste a la máquina a reptar más rápidamente de un lado que de otro. El microprocesador debe tener conocimiento de esta acción del conductor para colocar los pies en las posiciones adecuadas. Por ejemplo, si la máquina está girando hacia la derecha, los pies delanteros se transferirán a la derecha y los traseros a la izquierda para acomodarse al giro. Si la máquina camina hacia atrás, lo que se consigue invirtiendo el sentido del flujo del aceite, los pies deben dar los pasos hacia atrás, no hacia adelante. Cuando un pie se levanta del suelo, el ordenador de control determina su lugar de asentamiento futuro en función de la dirección del flujo del aceite y de su magnitud, parámetros fijados por el conductor. Cuando un pie sustentador se aproxima al límite de su trayectoria, el ordenador de control inicia su elevación y transferencia a una nueva posición. Si uno cualquiera de los pies sustentadores alcanza el límite permitido, el microprocesador detiene el vehículo hasta que levante del suelo el pie y lo lleve a un nuevo lugar donde tenga espacio para moverse.

El segundo tipo de control que realiza el conductor del vehículo es establecer la postura de la máquina y su altura sobre el suelo. El conductor puede actuar sobre un mando que modifica la posición vertical de los pies del lado izquierdo y derecho y dar de esta manera una inclinación lateral a la máquina hacia la derecha o hacia la izquierda. De forma similar puede indicar posiciones verticales diferentes para los pies delanteros y traseros y hacer que la máquina se incline hacia adelante o hacia atrás. Otros controles le permiten aumentar o disminuir simultáneamente la posición vertical de las seis patas para modificar su altura sobre el suelo.

El tercer tipo de control permitido al conductor es el de elegir cuidadosamente en qué lugares debe la máquina colocar los pies cuando está operando en terrenos muy escabrosos. Todavía no hemos decidido cómo llevar a cabo este tipo de control. Un vehículo con una tracción como la del nuestro, construido hace algunos años por Ralph Mosher en la General Electric Company, dependía exclusivamente de un control manual para realizar esta función; su manejo producía bastante cansancio al conductor. Pensamos que importa también la selección del tipo de marcha, pero no tenemos todavía suficiente experiencia para saber si se puede realizar automáticamente o si se necesita la ayuda de un operador. Precisamente hemos construido esta máquina para tratar de resolver esas cuestiones.

El otro tema de interés para nosotros lo constituye el andar y el correr, movimientos en donde el equilibrio desempeña un papel destacado. Hasta hace un siglo todavía se debatía si un caballo al trote tenía en algún momento todas sus patas en el aire. Las fotografías realizadas por Eadweard Muybridge acabaron con la disputa al mostrar que el caballo despegaba todos sus cascos del suelo una vez en cada trote. Una persona al correr realiza lo mismo con sus piernas; igual ocurre con un perro, un guepardo y, naturalmente, con un canguro. Estos animales no solamente andan, lo cual requiere equilibrio dinámico, sino que también corren siguiendo de forma eficaz movimientos balísticos para aumentar el trayecto recorrido en cada salto.

Existen dos diferencias fundamentales entre un vehículo que repta y que está equilibrado estáticamente y otro dotado de equilibrio dinámico. La primera se encuentra en la propia definición de estabilidad. Una máquina que repta es estable si sus patas proveen en todo momento al menos un soporte trípode que evita que vuelque; un vehículo que anda o corre, equilibrado dinámicamente, puede desnivelarse durante breves intervalos. El movimiento del cuerpo y de las patas asegura que la duración de uno de estos intervalos de desequilibrio sea breve y que se haya mantenido, en promedio, una base adecuada de soporte. Por ejemplo, un corredor toca el suelo alternativamente con sus dos piernas y proporciona una base de soporte de su cuerpo solamente a lo largo del tiempo.

La segunda diferencia entre equilibrio estático y dinámico se encuentra al considerar la velocidad y el momento. El equilibrio estático supone que la configuración de las patas sustentadoras y la posición del centro de gravedad son adecuadas para obtener estabilidad e ignora el movimiento del vehículo. Tales consideraciones estáticas no siempre son suficientes. Un vehículo con el centro de gravedad demasiado próximo a las patas delanteras puede volcar hacia delante si se detiene repentinamente. Para entender la mayor movilidad de los sistemas que andan y corren hay que admitir una definición de estabilidad no tan rígida y tener en cuenta, además, la velocidad cuando se determine el equilibrio.

Para estudiar el problema del equilibrio en su forma más simple, uno de nosotros (Raibert) ha construido, junto con sus colaboradores en la Universidad de Carnegie-Mellon, una máquina que brinca con su única pata y corre como un canguro dando una serie de saltos. Este artilugio puede parecer un palo saltarín controlado por ordenador. Nos hemos visto gratamente impresionados por la considerable simplicidad del algoritmo de control del equilibrio. A la máquina, en su forma actual, solamente se le permite moverse en un plano, de modo que puede bascular en una única dirección.

La máquina consta de dos partes fundamentales: un cuerpo y una pata. El primero provee la estructura principal y lleva válvulas, sensores y toda la circuitería electrónica. La pata es un sencillo mecanismo que no solamente

modifica su longitud a lo largo del eje, sino que también pivota con respecto al cuerpo gracias a una bisagra que llamaremos cadera. La pata se impulsa por un resorte de tensión ajustable, de forma parecida a como lo es la pierna de una persona por sus músculos elásticos y tendones. El resorte se encuentra encerrado en un cilindro de aire cuya presión está controlada mediante sensores y válvulas. El extremo de la pata posee un pequeño pie.

El movimiento articulado de la pata lo controla un actuador neumático, el cual aplica un par a la bisagra de la cadera. Una simple válvula de dos posiciones, activa-inactiva (on-off), gobierna el muelle; sin embargo para controlar el ángulo de giro de la articulación se necesita una servoválvula proporcional, esto es, un dispositivo con realimentación que responde proporcionalmente a la intensidad de la señal que recibe. Como el momento de inercia de la pata no llega al 10 por ciento del momento de inercia del cuerpo, ésta puede pivotar durante el vuelo sin impartir excesivo movimiento al cuerpo. La inclinación de éste se mide con un giróscopo, permitiendo al ordenador de control mantener al cuerpo en una postura normal. Otros sensores miden el ángulo de la cadera, la longitud de la pata, la presión del aire en el muelle, el ángulo entre el suelo y la pata y la fuerza que ejerce ésta contra aquél.

Tres lazos distintos de servocontrol regulan la máquina. Un lazo controla el movimiento vertical, otro el equilibrio y un tercero la postura del cuerpo. Todos ellos están sincronizados con el movimiento básico de la máquina: saltar.

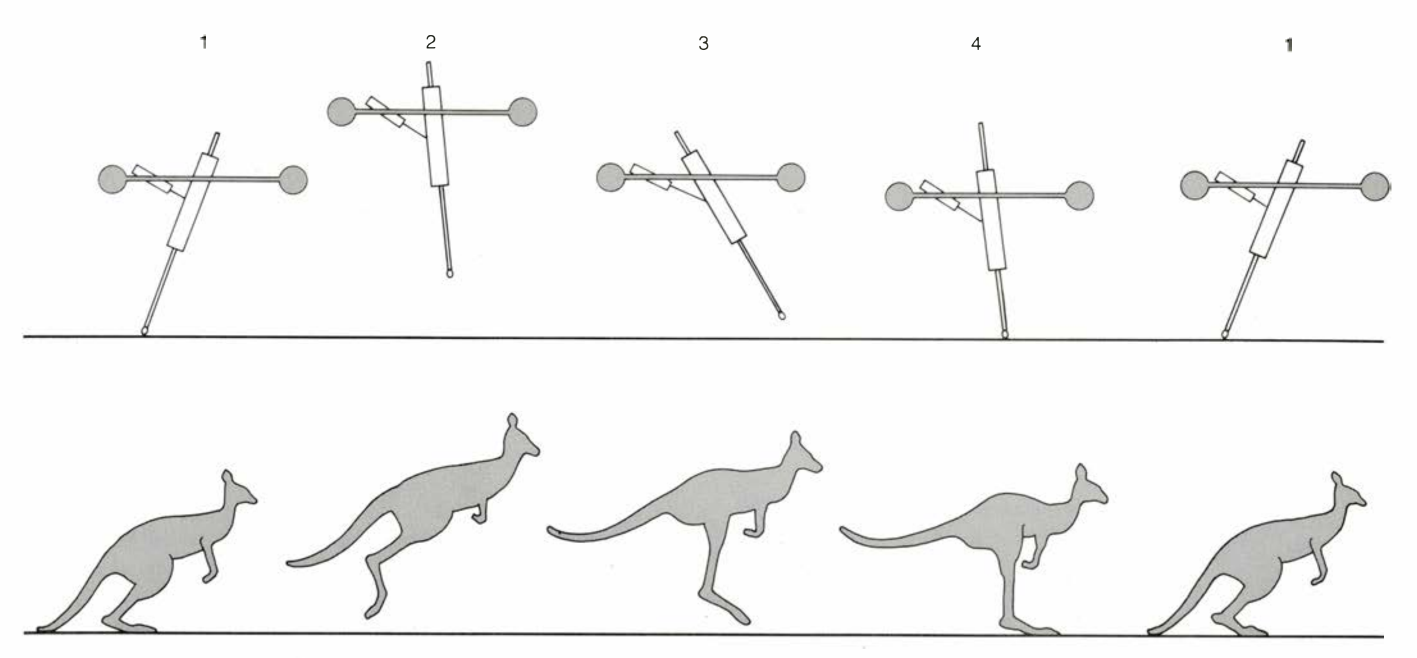
El primer lazo controla la altura del salto. Añade o quita energía al movimiento para dar la altura correcta al brinco y compensar la energía perdida en cada uno de ellos. El control de altura realiza ambas funciones, suministrando periódicamente aire o dejándolo escapar libremente del cilindro donde se aloja el muelle neumático para ajustar su tensión efectiva. En otras palabras, el control de altura gobierna los instantes de salto y la magnitud de la potencia desarrollada por el mecanismo impulsor; por tanto, consigue fijar la altura de salto deseada. Una vez seleccionada una altura, la mayor parte de la energía necesaria para el salto siguiente se obtiene del muelle donde se almacenó cuando la máquina tocó el suelo en el salto anterior. Mientras los movimientos que se realicen sean bastante estables, la tarea de gestionar la energía del salto de la máquina no encerrará mayor dificultad.

El segundo lazo de servocontrol se preocupa del equilibrio de la máquina: modifica la posición del pie durante el vuelo para que, cuando toque suelo, lo haga en una postura equilibrada. El cálculo de la posición correcta del pie tiene en cuenta la velocidad de avance del vehículo y la inclinación del cuerpo. Un sencillo algoritmo de control del equilibrio se ejecuta cuando la máquina salta sin avanzar, acelera para correr, corre a una velocidad constante, salva obstáculos o acorta su salto hasta obtener uno estacionario.

Cuando la máquina salta sin avanzar, la pata y el pie se mueven cortas distancias para compensar perturbaciones externas y los errores de los saltos anteriores. Si se dispone a correr, por ejemplo hacia la derecha, el pie se mueve primero hacia la izquierda para desequilibrar el vehículo y hacerlo caer en la dirección deseada. Cuando corre sin acelerar o decelerar, el proceso es parecido a cuando salta sin avanzar, salvo que los ajustes para el equilibrio suponen que la pata barre unos ángulos mayores que son función de la longitud entre dos saltos consecutivos. El frenado se efectúa de forma similar al proceso de aceleración, aunque ahora la máquina se inclina en la dirección opuesta a la del movimiento.

El tercer lazo de servocontrol estabiliza la postura del cuerpo y lo mantiene erguido. Suministra un par entre la pata y el cuerpo mientras el pie está en el suelo; consigue de esta forma la postura deseada en el vuelo inmediato. La eficacia de este servo depende de la magnitud de la fuerza de rozamiento entre el pie y el suelo. Este servo, cuya acción tiene lugar durante el período en que el pie está en el suelo, comparte los mecanismos actuadores de la cadera con el servo de equilibrio, el cual opera mientras la máquina se encuentra en el aire. Ciertos detalles sutiles sobre el cambio de un modo de control a otro están asociados al problema de detectar

6. MAQUINA SALTARINA BIDIMENSIONAL empleada para estudiar los problemas del control del movimiento con equilibrio. El ingenio opera recostado paralelamente a una pared inclinada y separado de ésta por un colchón de aire; la máquina sólo puede bascular sobre el plano definido por la pared. Un ordenador recibe los datos de los sensores de ángulo y presión y de un conmutador colocado en el pie. Controla el salto ajustando la presión dentro de una cámara neumática que actúa como un muelle. El ordenador aplica también un par entre la pata y el cuerpo para regular el ángulo de la cadera. Dicho ángulo determina el desplazamiento horizontal del pie y afecta, por consiguiente, al equilibrio.



7. SALTADOR EN MOVIMIENTO. Opera de forma cíclica, tal como lo hacen todos los sistemas que poseen patas; la pata atraviesa períodos de soporte y de vuelo. En la parte izquierda, la máquina se dispone a saltar. Mientras está en el aire, la pata pivota hacia adelante sobre la cadera para prepararse a tomar tierra. En el momento de contacto, el muelle se acorta hasta su longitud mínima al objeto de proporcionar impulso al salto siguiente. Un sensor de carga actúa de disparador del programa de control vertical. La máquina dispone de lazos de realimentación para controlar la postura y el equilibrio en sincronía con el control vertical. Como un palo saltarín, la máquina sólo balancea mientras salta. El salto es como el movimiento del canguro.

el comienzo y el final de cada vuelo. El mecanismo que suministra el par debe estar desconectado durante estos momentos; de lo contrario, el pie resbalaría en el suelo.

Cuando un animal corre, sus patas van hacia adelante y hacia atrás, barriendo grandes ángulos, para conseguir dos cosas: equilibrio y movimiento de avance. Hemos llegado a la conclusión de que no es necesario programar tales movimientos pendulares de las patas de forma explícita en la máquina, ya que son consecuencia natural de las interacciones de los controladores del equilibrio y de la postura. Supongamos que el vehículo está avanzando a una velocidad constante en un plano horizontal y que está a punto de tocar el suelo después de un salto. ¿Qué debe hacer el controlador de postura durante la fase de reposo para mantener erguido el cuerpo? Asegurará que no se produzca ningún par en la articulación de la cadera. Por hallarse, durante esta fase, el pie fijo en el suelo, la pata pendulará hacia atrás un ángulo tal que anule dicho par a la vez que el cuerpo se dirija hacia adelante.

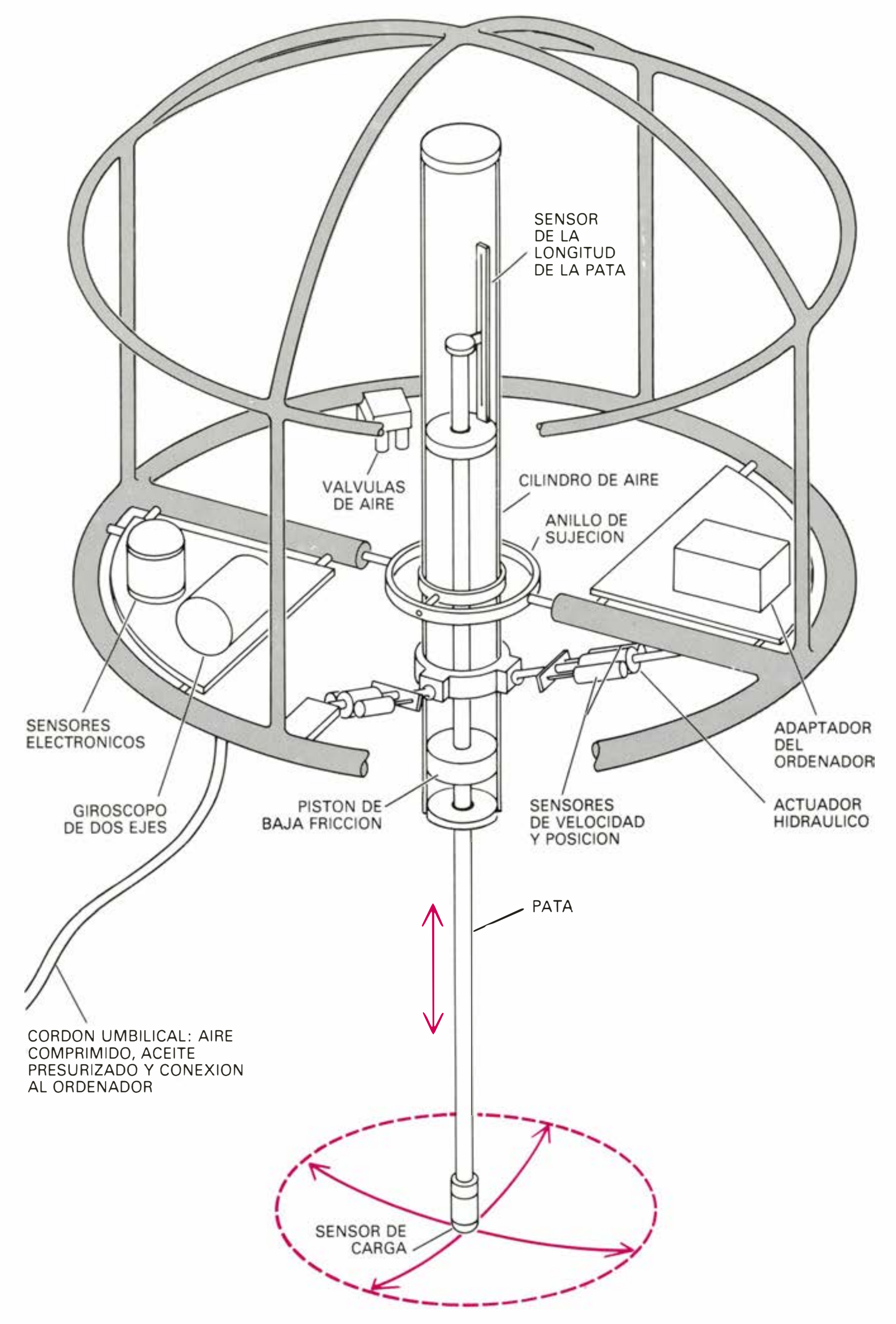
¿Cómo debe actuar el otro servo durante el período de vuelo para mantener el equilibrio? Puesto que el pie ha de estar aproximadamente el mismo tiempo tanto delante del centro de gravedad como detrás, la longitud del trayecto y la duración del período de reposo determinan que la pata esté dirigida hacia delante para colocar su pie, cuando llegue al suelo, en el lugar adecuado durante el período de reposo siguiente. Por tanto, en cada vuelo, la pata oscilará hacia delante bajo la dirección del servo del equilibrio y en el período de reposo lo hará hacia atrás movida por el servo de postura. El movimiento pendular necesario para correr surge automáticamente de la acción mutua de ambos servos de control.

En estos momentos estamos construyendo una versión de la máquina que mantendrá el equilibrio en las tres dimensiones; podrá moverse en un local abierto. Hemos simulado en un ordenador el comportamiento dinámico de una de estas máquinas y hemos observado que también se puede dividir el control en los mismos tres lazos de servocontrol que posee la máquina que ya hemos descrito.

Nuestro esfuerzo en conseguir que la máquina con una sola pata pudiera correr se vio facilitado en gran medida gracias a una idea que se nos ocurrió durante el desarrollo de los trabajos. Era la siguiente: se entiende mejor la acción de correr si el control global se descompone en las tres partes desarrolladas antes (control de altura, control del equilibrio y control de la postura). Esta división ha supuesto que el complicado comportamiento de las patas o piernas al andar o correr se comprenda de una forma mucho más sencilla. Esta manera de abordar el problema nos ha conducido hacia un sistema de control bastante sencillo que permite a la máquina correr y mantener el equilibrio.

El éxito conseguido con este trabajo nos anima a proyectar máquinas similares con varias patas. Pensamos que el método correcto de enfocar el problema con tales máquinas consiste en estudiar su comportamiento respecto al movimiento de arriba abajo y respecto al equilibrio, en primer lugar, y posponer las complicaciones que supone introducir movimiento de avance. La idea de que saltar constituía la actividad principal en la máquina con una sola pata era lógica; y resultó eficaz a la hora de estudiar su comportamiento. Pero esta idea parece menos lógica para máquinas con varias patas. La razón puede residir en que estamos acostumbrados a ver correr a los animales y deseamos explicarnos de una sola vez todo su comportamiento.

Una máquina con cuatro patas que salta sobre el mismo lugar sin avanzar puede utilizar cualquier secuencia de actividad de sus patas. La más sencilla sería la de saltar simultáneamente con las cuatro. No es difícil imaginarse que los mismos tres servomecanismos que controlan el salto de una máquina con una pata pueden también gobernar el movimiento de un vehículo con tres patas más en este modo de funcionamiento. En realidad, el lazo de control de la postura que mantiene erguido al cuerpo puede ser substancialmente más simple debido a que la base de soporte es más amplia. Cuando la máquina avanzase, las patas oscilarían al unísono. Este tipo de mo-



8. MAQUINA SALTARINA AVANZADA, en fase de realización, proyectada para operar en tres dimensiones. Mide un metro, pesa 20 kilogramos y está conectada a un ordenador situado en sus proximidades. El aire comprimido suministra la potencia requerida para el salto y regula la altura del mismo. Los actuadores del pie son hidráulicos. Durante el vuelo, corresponde a ellos mover el pie para mantener el equilibrio. También se ocupan de conseguir la verticalidad del cuerpo una vez que el pie se afirme.

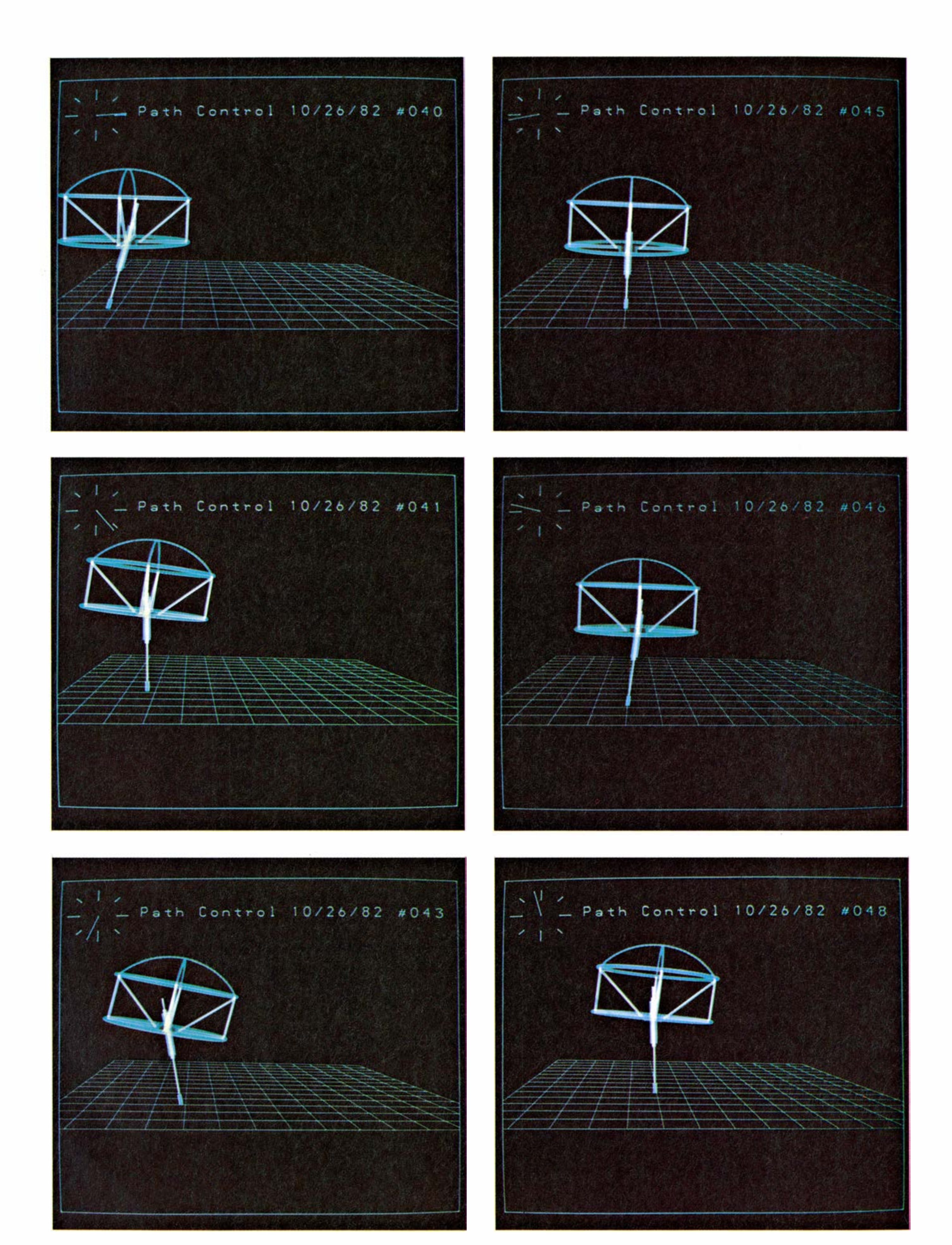
vimiento podría generarse por los mismos mecanismos de control que utiliza la máquina de una sola pata.

Otra forma posible de saltar sobre el mismo lugar que tendría una máquina con cuatro patas consistiría en brincar sobre los pares de patas diagonalmente opuestos. No necesitamos mucho esfuerzo de imaginación para ver que se puede separar el control del vehículo en uno de altura, otro del equilibrio y un tercero de la postura. El primero añadiría energía al salto para mantener la altura en los niveles deseados. El segundo movería las dos patas que están en el aire de tal forma que se mantuviese el equilibrio. Por último, el control de la postura aplicará el par de fuerzas apropiado a las dos patas que están en el suelo. Este control y el del equilibrio alternarían la utilización de los mismos actuadores de la pata, tal y como lo hacen en la máquina que hemos descrito. Es más, según vimos en esa máquina, el movimiento de avance se podría conseguir fácilmente con sólo modificar la posición de cada pie que está en el aire de suerte que apunte hacia adelante y poder anular de este modo, durante la siguiente fase de reposo, el promedio de las fuerzas que afectan al equilibrio de la máquina. El resultado es un movimiento de trote del tipo que poseen los animales cuadrúpedos.

De forma parecida se pueden imaginar otros dos tipos de marcha separando el control de cada pata en sus componentes vertical, de equilibrio y de postura. Durante el galope, las patas traseras tocan el suelo un poco antes que las delanteras. La postura del cuerpo puede cambiar durante el vuelo, de forma que veamos una posición de cabeza erguida cuando las patas traseras llegan al suelo y otra de cabeza agachada al despegar del suelo las patas delanteras. El resultado es una variación del galope, en el que las patas delanteras operan casi al unísono, al igual que las traseras, si bien las acciones de ambos pares están espaciadas por igual en el tiempo. Este balanceo de las patas le permite al guepardo correr a velocidades superiores a los 90 kilómetros por hora.

Un movimiento eficaz sobre el suelo requiere que la máquina pierda poca energía mientras evoluciona. Ya hemos indicado cómo pueden hacerse eficaces los movimientos verticales de las patas al almacenar la energía en elementos elásticos. ¿Qué ocurre con la oscilación que realizan las patas hacia adelante y hacia atrás?

Cuando la velocidad respecto al suelo es elevada, las patas del vehículo tienen que moverse adelante y atrás con bastante rapidez. La mayor parte de la energía que consume un animal al correr la utiliza en producir este movimiento de sus patas. En nuestra máquina monopié estas oscilaciones las generaba un servomecanismo proporcional convencional. En un sistema así, la energía cinética de la pata se pierde completamente ya que ésta se mantiene en reposo en cada ángulo extremo. El movimiento de salto se obtiene, por otra parte, mediante un sistema resonante constituido por el muelle de la pata y la masa de la máquina, de modo que el servo de altura sólo necesita suministrar o extraer una cantidad pequeña de energía para mantener la altura deseada del salto. Es obvio que, si se desea que una máquina con varias patas sea eficaz y rápida al mismo tiempo, tendrá que incorporar algún tipo de sistema resonante para el movimiento oscilatorio de sus patas. Se podría diseñar tal mecanismo colocando muelles entre las patas para hacerlas oscilar, como si formaran un diapasón, a una frecuencia adecuada al número de saltos verticales.



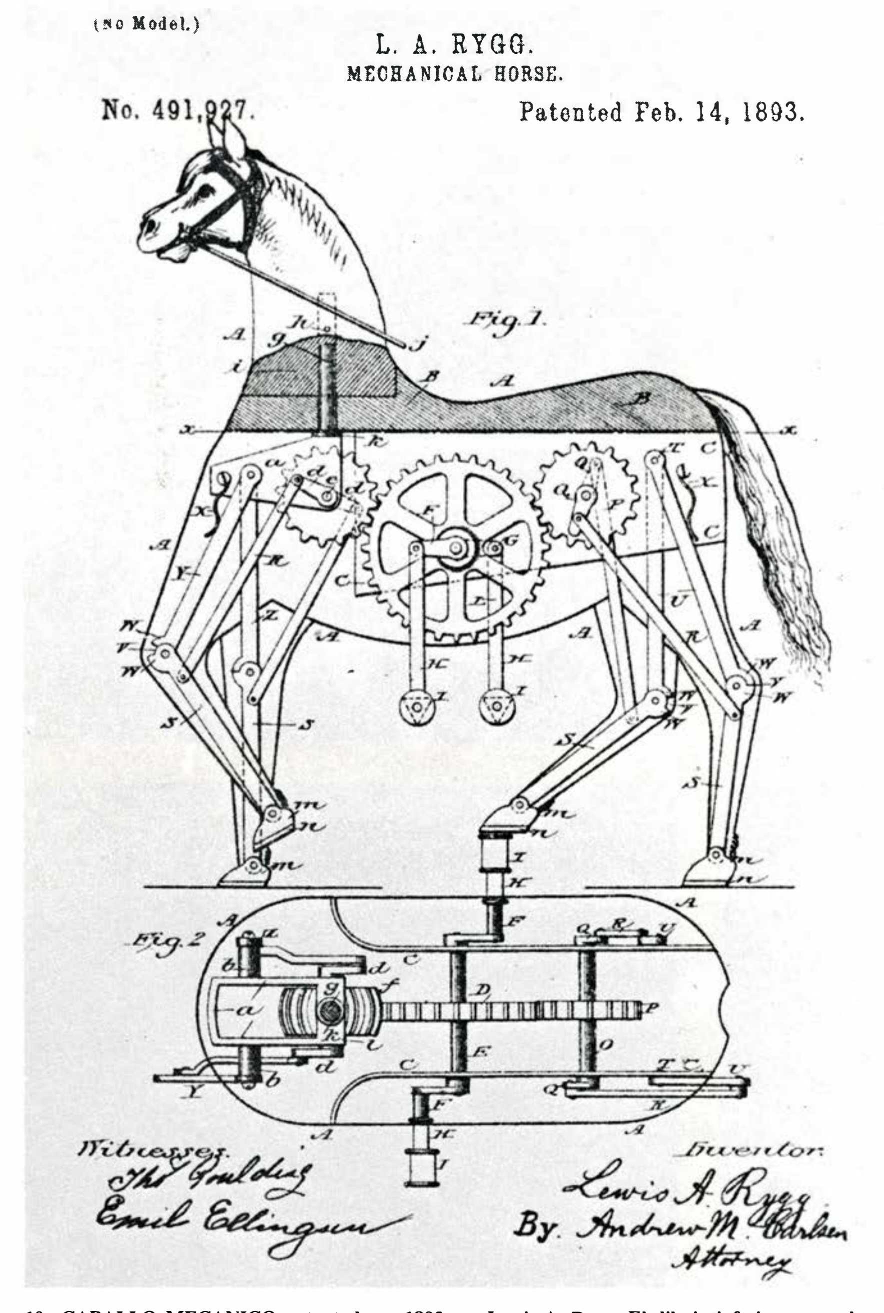
9. MOVIMIENTO SIMULADO del saltador tridimensional secuenciado en estas fotografías de la pantalla del ordenador que está efectuando la simulación del mismo. Durante un período de 0,7 segundos se observa cómo la máquina logra equilibrarse por sí misma mientras toma tierra y salta de nuevo.

Aunque creemos saber cómo construir una máquina cuadrúpeda que corra en cualquiera de los tipos de marcha que hemos descrito, quedan todavía sin resolver muchas cuestiones interesantes asociadas a la puesta en funcionamiento y parada de tales ingenios, así como a la selección de su forma de moverse. Podemos comprender fácilmente cómo iniciar la marcha si la máquina se encuentra dando saltos sobre el mismo lugar. Mucho menos obvio resulta cómo coordinar la transición desde el reposo hasta la plena carrera. Y lo mismo, ¿cómo y cuándo una máquina así puede cambiar su forma de evolucionar? Un caballo que corre modifica su dirección al girar, es decir, decide cuál de las patas delanteras precede ligeramente a la otra. ¿Qué cálculos deberían realizarse para introducir estos pequeños cambios en la estructura del movimiento de la pata? Encontramos fascinantes estos problemas tanto desde el punto de vista de ingeniería ("¿qué deberíamos construir?") como desde el científico ("¿cómo funcionan los sistemas vivos?").

Un problema mucho más difícil es el de escoger los lugares donde la máquina apoye sus pies. La función que desempeña la vista en las personas y los animales al andar y al correr, en particular, la facultad de elegir los lugares adecuados para poner los pies, no se conoce bien del todo. Podríamos pensar que este problema lo evitaríamos permitiendo que la máquina corriera veloz sólo en terrenos lisos e introduciendo algún tipo de asistencia humana para elegir un camino seguro. Probablemente será deseable escudriñar el terreno que tiene enfrente el vehículo por si hay oquedades. Es más, debemos suponer que, al igual que le ocurre a un caballo al galope que corre el riesgo de introducir sus patas en una madriguera, la máquina puede verse involucrada en un aprieto parecido.

La movilidad de los vehículos todo terreno está limitada por dos factores. El primero es el giro continuo de las ruedas y de las orugas que impide hacer uso de puntos de apoyo discontinuos, que sí les están permitidos a los vehículos con patas. Compartimos la opinión de que la ciencia de los ordenadores ha avanzado camino suficiente para permitir la construcción de sistemas de control adecuados para vehículos con patas. La alternativa que plantea la existencia de tales vehículos merece seria consideración. En estos momentos, la Defense Advanced Research Projects Agency está ya apadrinando investigaciones sobre estos vehículos, una de las cuales es precisamente la que estamos llevando a cabo.

Una segunda fuente de movilidad está en poseer una anchura pequeña: una motocicleta puede introducirse en lugares vedados para un jeep. Se pueden construir vehículos con patas que sean estrechos, pero tendrán que mantener el equilibrio al menos en las direcciones laterales. Envueltos como estamos en la construcción de vehículos con seis patas que reptan sin preocuparse del equilibrio y en estudios sobre la forma de andar y correr manteniendo el equilibrio, creemos que lo más importante de todo ha sido el esfuerzo realizado para entender la naturaleza del equilibrio. Pensamos que los experimentos con estas máquinas de seis patas que se están llevando a cabo en nuestro laboratorio y en otros son principalmente ejercicios sobre el control de múltiples patas y no son en sí mismos útiles; tales "reptiles" serán reemplazados en última instancia por máquinas con menos patas que guarden el equilibrio. El dominio sobre éste contiene la clave para construir máquinas de gran movilidad que anden y corran.



10. CABALLO MECANICO patentado en 1893 por Lewis A. Rygg. El dibujo inferior es un plano del interior visto a través del corte efectuado a lo largo de la línea *x-x* de la Fig. 1. Los estribos actúan de pedales que permiten al jinete iniciar la marcha. La conducción debía hacerse con unas riendas que movían las patas delanteras y traseras de un lado a otro. Parece ser que nunca se construyó la máquina. Hubiera sido similar a muchos juguetes mecánicos modernos que, al carecer de capacidad sensorial y de cálculo, no pueden adaptarse a las irregularidades del suelo. Tan sólo reptan en superficies lisas.

Células ciliadas del oído interno

Se trata de transductores altamente sensibles que facilitan las sensaciones de audición y equilibrio. Una fuerza sutil aplicada al ápice celular produce una señal eléctrica en el polo basal

A. J. Hudspeth

A primera vista, no parece que tengan mucho que ver la audición, el equilibrio para una marcha erguida en el hombre, la capacidad de ciertos animales para detectar vibraciones en el suelo y la de los peces para percibir el desplazamiento del agua. Sin embargo, es un hecho que estas cuatro sensaciones están íntimamente relacionadas, a través de un mismo tipo de receptor: la célula ciliada sensorial, caracterizada por un penacho fascicular de protrusiones celulares muy finas, que surgen de su polo apical. Esta célula es un transductor mecano-eléctrico extraordinariamente sensible, que convierte la fuerza mecánica en señal eléctrica, es decir, el estímulo aplicado al hacecillo ciliar en mensaje encauzado hacia el cerebro.

Cada célula ciliada es sensible solamente a un limitado margen de estímulos. En consecuencia, y dado que el organismo necesita información útil acerca de su ambiente y de sus propios movimientos, habrán de combinarse miles de receptores que den salida a su respectivo mensaje. Tal número de células ciliadas se reparten por los diversos y diminutos órganos sensoriales del oído interno. En el hombre existen seis de esos órganos a cada lado de la cabeza, con hileras de miles de células ciliadas cuya sensibilidad varía muy ligeramente de unas a otras. Las respuestas combinadas de esas células proporcionan información sobre la aceleración lineal en cualquier dirección, la aceleración angular respecto a los tres ejes espaciales y sobre los tonos audibles en un amplio margen de frecuencias.

Aunque la estructura general de la célula ciliada y el papel sensorial de sus receptores se conocen desde hace muchos años, es ahora cuando comienza a dilucidarse el comportamiento individual de esa célula. Para el examen de los acontecimientos a escala celular hemos trabajado con células ciliadas aisladas del oído interno de la rana toro (*Rana catesbeiana*), haciendo presión sobre el penacho ciliar mediante una microsonda y registrando simultáneamente el potencial eléctrico de salida de la célula. Con este dispositivo se ha conseguido por primera vez el registro de una sola célula durante la aplicación de un estímulo mecánico, perfectamente controlado, sobre el hacecillo ciliar.

Las células ciliadas responden a estímulos notablemente pequeños. Las de los mamíferos empiezan a elaborar respuestas en cuanto el extremo apical del hacecillo se desplaza no más de 100 picometros (billonésimas de metro); esta distancia se aproxima al diámetro de algunos atómos. Los registros de estas células aisladas demuestran, además, que cada receptor tiene un máximo de sensibilidad para determinada dirección del estímulo; al desplazar el hacecillo en una dirección, la célula sólo responde a la componente del movimiento que va en su dirección de máxima sensibilidad. Los registros, en combinación con observaciones al microscopio óptico, o al electrónico, están comenzando a proporcionar amplia información del trabajo de los receptores sensoriales del oído interno. Quedan, por supuesto, muchas cuestiones pendientes, entre ellas la más acuciante: cuál sea el mecanismo molecular por cuya virtud el desplazamiento del penacho ciliar altera las propiedades eléctricas de la célula y determina el envío de un mensaje hacia el cerebro.

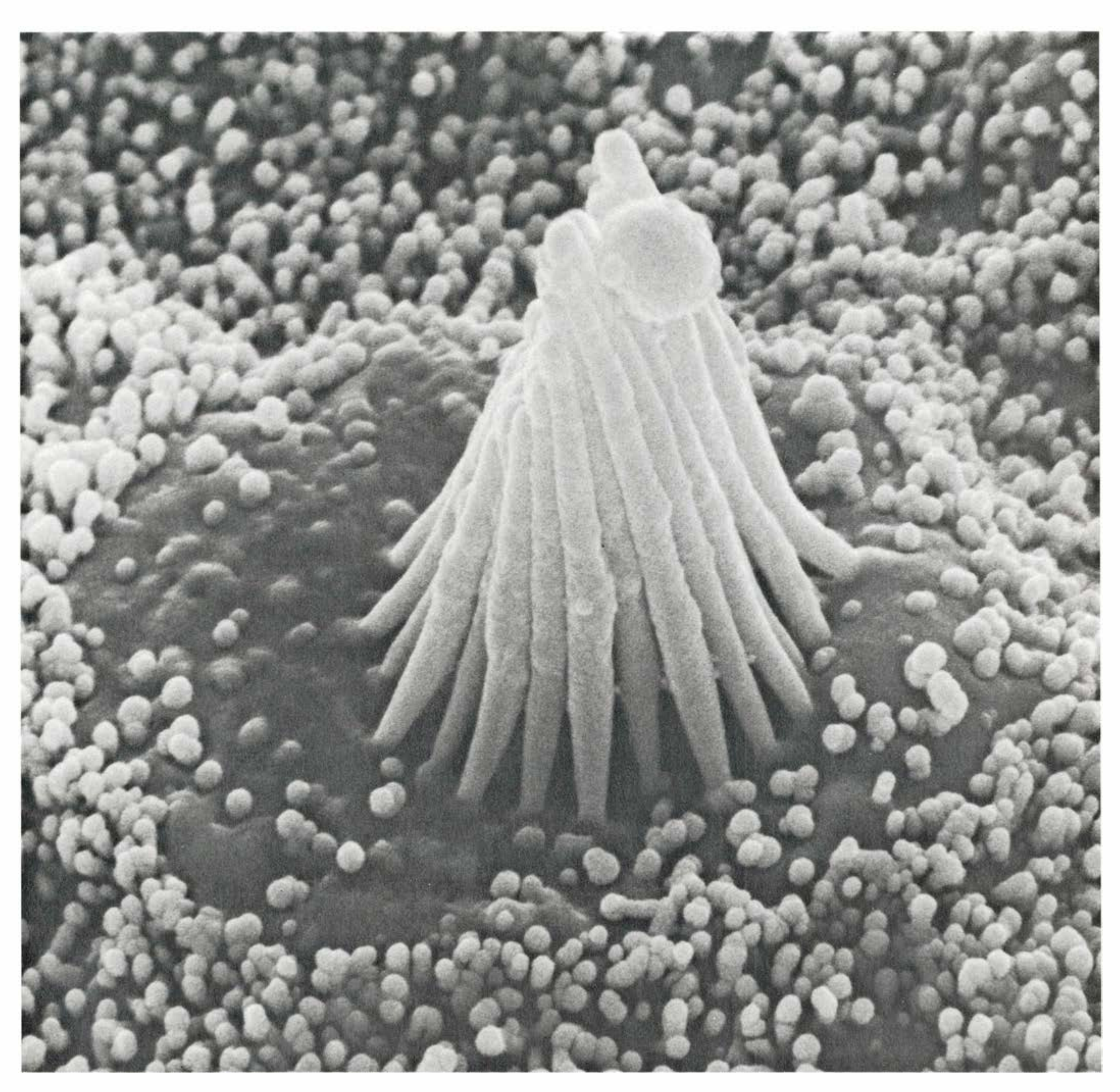
La célula ciliada presenta una forma cilíndrica o en matraz. Se integra siempre en un epitelio de uno o pocos más estratos celulares. Estrechamente emparentada con la célula nerviosa, o neurona, carece, sin embargo, de prolongaciones filamentosas –dendritas y axón–, que partan del cuerpo celular y transmitan señales eléctricas al sistema nervioso. De ahí que también se las llame paraneuronas. En los epitelios que las contienen, el extremo apical de las células ciliadas aflora a la superficie al mismo nivel que las células de soporte contiguas. Ambos tipos celulares forman así una superficie lisa de la que emergen los mechones o hacecillos ciliares. La longitud de estos hacecillos varía, según las células, desde tres hasta más de 100 micras (millonésimas de metro).

Las sutilezas estructurales del hacecillo ciliar cambian también de una especie a otra, e incluso de un órgano a otro del oído interno del mismo individuo. Lo que no obsta para que el patrón fundamental de estos penachos sea común a todos los vertebrados. Cada uno consta de 10 a 150 prolongaciones muy delgadas, en forma de bastón. Las prolongaciones reciben el nombre de cilios; se reparten entre dos tipos estructurales absolutamente distintos. Todos los filamentos del haz, menos uno, constituyen los estereocilios, orgánulos cilíndricos o en maza que muestran en su parte axial interior unos microfilamentos densamente empaquetados. El plasmalema, o membrana superficial de la célula, recubre el estereocilio como el dedo de un guante el de la mano. El diámetro de los esterocilios varía entre una y dos micras.

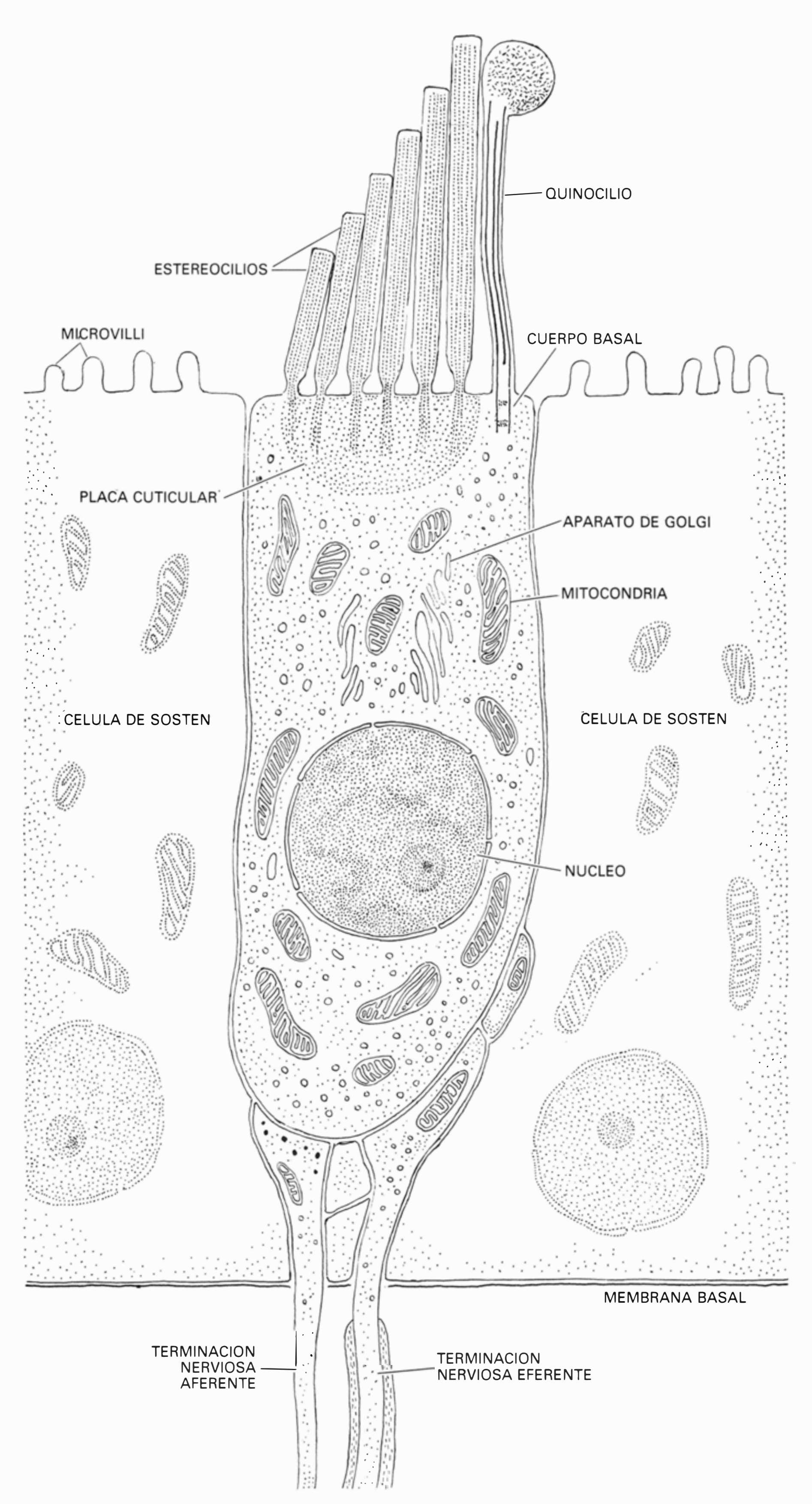
A pesar del nombre con el que se designan, no se trata de verdaderos cilios. Un cilio auténtico, el de un espermatozoide por ejemplo, posee una compleja estructura central, altamente diferenciada, el axonema, donde se origina la motilidad propia de los cilios en general, comparable en todo con la de un remo en acción. Los penachos de la célula ciliada sensorial tienen un solo cilio verdadero, el quinocilio, con más de 25 micras de diámetro, dos túbulos centrales y nueve pares de microtúbulos periféricos que comparten un tabique intermedio; todo ello semeja a los axonemas de otros cilios. El quinocilio carece de motilidad propia, y su extremo distal suele quedar adherido a los estereocilios adyacentes.

Los estereocilios se disponen en el hacecillo dentro de un orden riguroso. Rodeados por otros seis equidistantes, muestran una longitud desigual. Si un plano transversal corta el haz tendremos una sección circular; hay un diámetro a lo largo del cual se comprueba, simétricamente a cada lado, el aumento progresivo en la longitud de los estereocilios. Todos los planos perpendiculares a este diámetro comprenden estereocilios de longitud uniforme. Así pues, el penacho ciliar consta de hileras isométricas ordenadas por la longitud de los cilios, con un plano perfectamente definido de simetría bilateral. En la célula libre de manipulación, los estereocilios no guardan una posición uniformemente perpendicular a la superficie apical de la misma, sino que se acercan unos a otros para formar un cono truncado y oblicuo. El quinocilio se sitúa en uno de los dos bordes del cono contenidos en el plano de simetría. Cerca de sus extremos, los cilios se aproximan o incluso contactan entre sí.

Durante el desarrollo del embrión humano, las células matrices para el oído interno aparecen primero como dos placodas, o pequeños acúmulos celulares, planas y gruesas, que se sitúan en la superficie externa, a ambos lados del tronco cerebral en formación. A medida que aumentan de tamaño, van hundiéndose hacia el interior, hasta que terminan por perder su contacto con la



1. PENACHO CILIAR, estructura que da nombre a la célula ciliada y es responsable de su sensibilidad mecánica. El penacho, o hacecillo, aparece aquí aumentado 14.000 veces en una micrografía electrónica de barrido, correspondiente a una célula ciliada del oído interno de la rana toro, tomada por Richard A. Jacobs, del Instituto de Tecnología de California. Estas células se encuentran en epitelios, extensiones de tejido de pocos estratos celulares, y están rodeadas por células de sostén. El hacecillo de esta imagen consta de unas 50 proyecciones filamentosas. Todas menos una son estereocilios, que, a pesar de su nombre, no constituyen verdaderos cilios. El penacho tiene un solo cilio genuino, el quinocilio, cuyo extremo distal en maza destaca en la parte superior derecha del hacecillo. La estructura en conjunto se muestra en posición de reposo: forma un cono oblicuo con el vértice truncado. La inflexión del hacecillo que lo aparta de su posición de reposo determina que la célula ciliada envíe una señal eléctrica hacia el cerebro. La multitud de proyecciones pequeñas, de color claro, que aparecen alrededor del hacecillo, corresponden a microvellosidades que parten de células de sostén vecinas.



2. CELULA CILIADA en sección transversal. Suelen adoptar estas células una forma cilíndrica o de matraz. Aunque están muy emparentadas con las neuronas, no poseen dendritas ni axón. La organización del hacecillo ciliar varía con la especie en los detalles, pero su estructura general se mantiene en todos los vertebrados. Se aprecia, en el sentido de un eje, un aumento progresivo de la longitud de los estereocilios. A lo largo de los ejes perpendiculares al referido, los estereocilios tienen la misma longitud. El hacecillo tiene, por tanto, un plano de simetría bilateral, y la figura corresponde a un corte por él. El quinocilio se encuentra en ese plano de simetría, en el borde más alto del cono. La terminación nerviosa aferente, situada en la superficie basal de la célula, transmite la respuesta del receptor hacia el cerebro.

superficie. Una vez que se separan de esta última, se transforman en las conocidas vesículas óticas, cada una de las cuales constituye una diminuta bolsa de tejido epitelial, llena de líquido.

La vesícula ótica presenta un desarrollo complejo, con procesos de crecimiento, curvatura y fusión de sus partes. Así resulta la formación de seis órganos receptores que contienen las células ciliadas. Los tres canales, o conductos, semicirculares son tubos toroidales, en forma de rosquilla, que sirven de órganos receptores para la aceleración angular. Están combinados de tal modo que, cuando la cabeza se encuentra en su posición erguida habitual, cada uno de los conductos queda en uno de los tres planos del espacio: horizontal, x, transversal y y vertical parasagital z. El utrículo y el sáculo son cavidades pequeñas e irregulares que constituyen los órganos sensibles a la aceleración lineal. El caracol, o cóclea, tiene forma espiral y es el órgano de la audición.

El oído interno completamente desarrollado presenta una geometría muy compleja, derivada de los procesos ya indicados de curvatura, ramificación y fusión, a partir de la vesícula ótica; de aquí su denominación de laberinto. A pesar de esta complejidad, los seis órganos sensoriales que lo componen ofrecen un diseño básico sencillo, consecuente con la forma de la vesícula y la presencia inicial de una lámina epitelial continua, que descansa sobre un soporte de tejido conjuntivo. El epitelio circunscribe un espacio interior cerrado, lleno de un líquido llamado endolinfa. Por fuera del epitelio queda otro espacio lleno de líquido extracelular ordinario, que se acumula especialmente en algunas partes del oído interno, por lo que recibe el nombre de perilinfa. El conjunto de estructuras queda encapsulado por cartílago o hueso.

El epitelio separa, por tanto, dos líquidos diferentes y en su seno lleva células ciliadas que contactan con ambos: la endolinfa, con la superficie apical de dichas células, y la perilinfa, con la parte basal o soporte de las mismas, hacia la parte exterior al órgano. Estos compartimentos de fluido desempeñan, como luego veremos, un papel importante en la función de la célula ciliada.

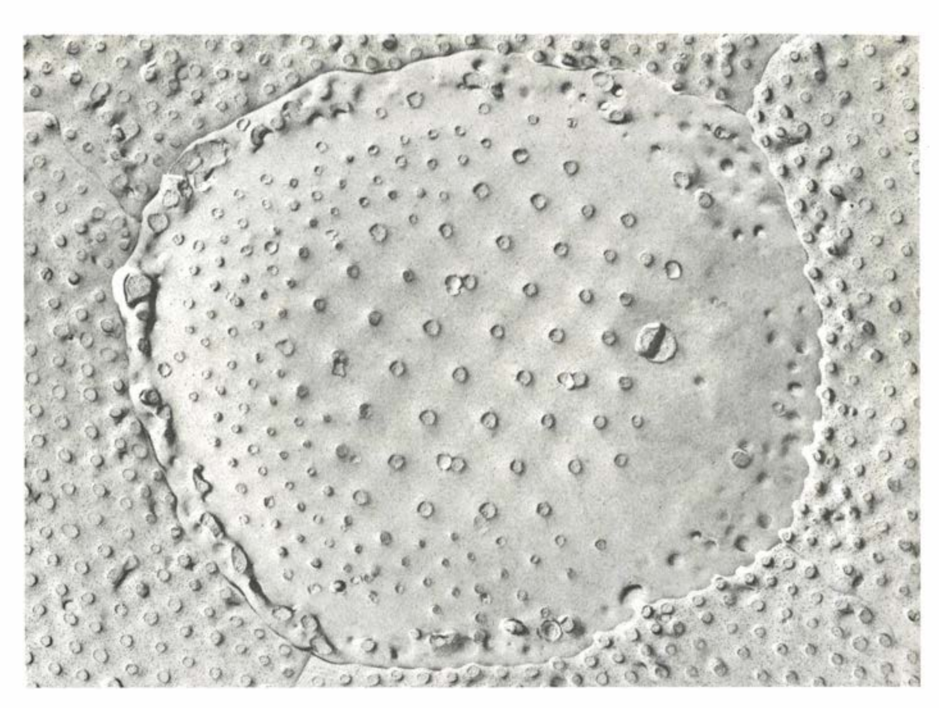
Para valorar la actividad de esta célula hay que tener en cuenta el mecanismo operativo en cada uno de los órganos del laberinto. Tanto el utrículo como el sáculo se disponen de suerte tal que el conjunto de los cuatro (dos en

cada oído) procura una sensibilidad frente a la aceleración lineal en cualquier eje del espacio. Importa todavía más el hecho de que ambos pares, de utrículos y de sáculos, controlen constantemente la aceleración debida a la gravedad; resultan así cruciales para la regulación postural, la marcha y el equilibrio. No obstante la complejidad de la sensibilidad direccional de utrículo y sáculo, podemos aceptar la idea de que el utrículo responde a la aceleración horizontal y el sáculo a la vertical.

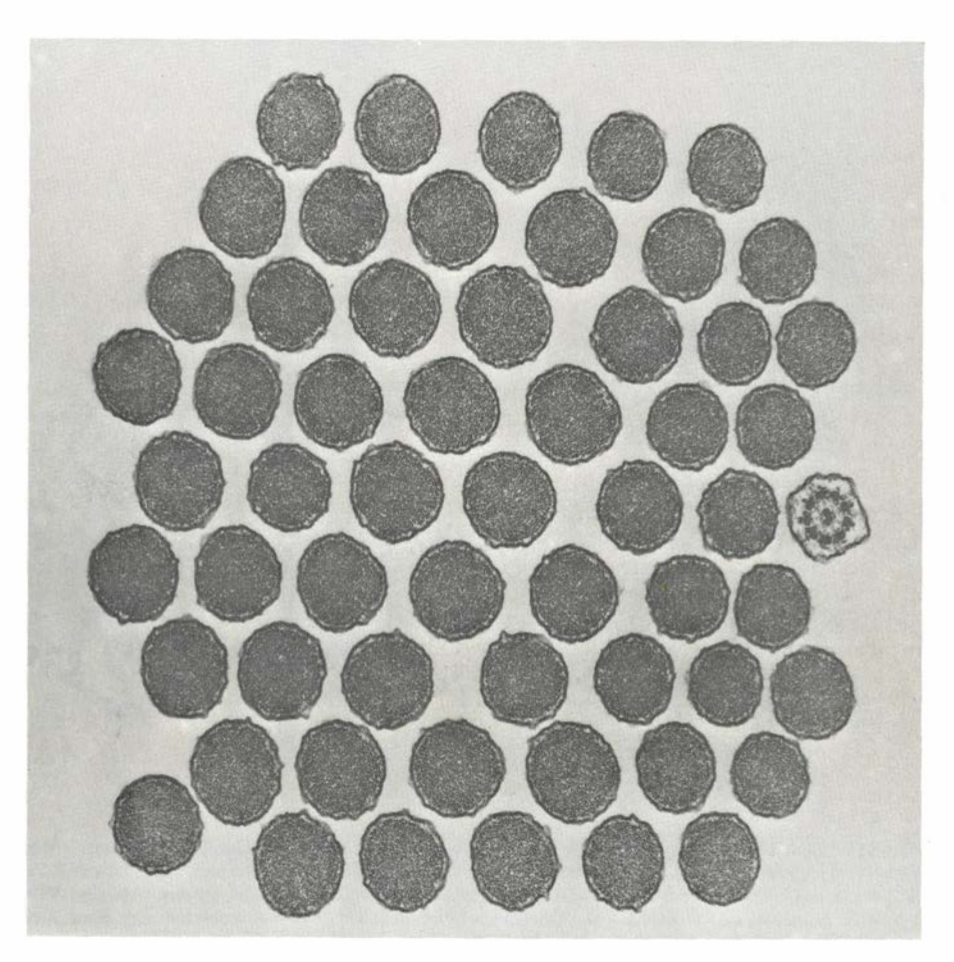
Las células ciliadas del utrículo y del sáculo constituyen, en cada caso, un engrosamiento o placa semilunar en el seno del epitelio, de un milímetro aproximado de ancho. Dicha placa es sensiblemente plana y contiene algunos miles de células ciliadas. La placa del sáculo queda orientada preferencialmente en un plano vertical; en el utrículo, el plano de orientación es principalmente horizontal. Una membrana, llamada otolítica, yace paralela junto al epitelio ciliar; está constituida por una trama de moléculas proteicas. El quinocilio de cada célula ciliada se inserta en una indentación de esta membrana, en cuya parte superior se disponen, apilados, centenares de miles de pequeños cristales, las otoconias. Estas últimas se componen de carbonato cálcico, casi siempre en forma de calcita, precipitado sobre una matriz orgánica.

La densidad de las otoconias supera, varias veces, la propia de la endolinfa que llena el utrículo y el sáculo. En consecuencia, cuando los órganos sufren aceleración, la mayor inercia de las otoconias produce un retraso en el desplazamiento respecto a la endolinfa. Dicho retraso se transmite como movimiento contrario de la membrana otolítica sobre el hacecillo ciliar de cada célula sensorial. El estímulo que realmente llega a la célula ciliada es una fuerza aplicada al extremo del penacho ciliar, en sentido opuesto al de la aceleración del sistema.

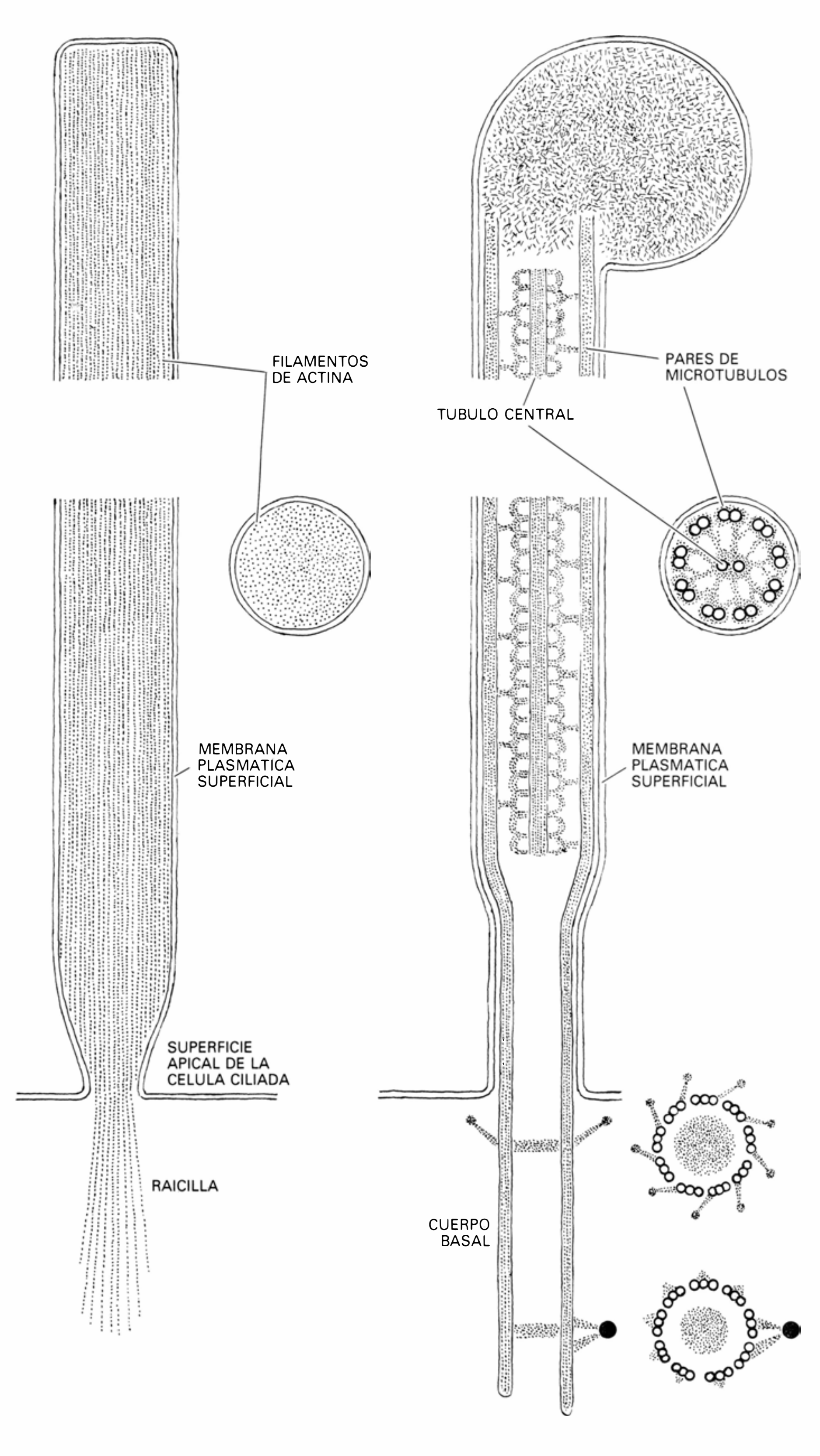
Una fuerza mecánica semejante se transmite, de distinto modo, al extremo del hacecillo ciliar, en los conductos semicirculares. Cada uno de ellos constituye un tubo encorvado circularmente, con un diámetro de unos seis milímetros. En la llamada región ampular se amplía el diámetro y aparece, en el plano transversal, un tabique o septo incompleto en forma de promontorio celular, la crista ampullaris, cubierta por un material extracelular, la cúpula, más o menos afilada hacia el centro del canal. Las células ciliadas se sitúan en la



3. AGREGACION HEXAGONAL de estereocilios, plasmada en una micrografía electrónica correspondiente a un hacecillo ciliar del oído interno de la rana toro, a 16.000 aumentos. La micrografía se obtuvo después de congelar el epitelio y eliminar todo el material que sobresalía de la superficie apical. Las fositas de la célula ciliada corresponden a puntos de inserción de estereocilios; cada una está rodeada por seis equidistantes. El cabo roto de gran tamaño que se distingue a la derecha corresponde al quinocilio.



4. ESTRUCTURA INTERNA del quinocilio. Difiere totalmente de la que presentan los estereocilios. Los elementos centrales de ambas clases de cilios aparecen aumentados 40.000 veces. El núcleo del estereocilio lo forma un haz de tenues filamentos. El quinocilio, a la derecha de la figura, muestra en cambio en su parte central la compleja estructura de un axonema. Esta micrografía de transmisión se obtuvo tratando los cilios con fijadores que los filamentos y túbulos captan mejor que las demás estructuras.



5. ESTEREOCILIO Y QUINOCILIO en secciones vertical y horizontal, a la izquierda el primero y a la derecha el segundo. Los estereocilios tienen forma de lápiz o de bate de béisbol, con un diámetro de 0,2 a una micra (millonésimas de metro), según las células. La raicilla del estereocilio penetra en la superficie apical de la célula. La constricción del extremo inferior del cilio facilita su inflexión. Los filamentos paralelos de su columna central son de actina, una proteína; están, además, muy unidos entre sí por enlaces transversales, lo cual da rigidez al cilio. A semejanza de otros cilios verdaderos, el axonema del quinocilio está formado por dos túbulos centrales, rodeados por nueve pares de microtúbulos que comparten un tabique intermedio. El axonema aparece mejor definido en su sección horizontal, en la parte superior derecha de la figura. La sección vertical del quinocilio atraviesa uno de los dos túbulos centrales pero no interesa al otro. La membrana de la célula ciliada recubre por completo ambas clases de cilios.

cresta y sus penachos ciliares proyectados hacia el centro de la ampolla quedan insertados en la gelatina cupular.

Cuando el canal semicircular experimenta una aceleración angular (por ejemplo, durante un movimiento rápido de rotación de la cabeza), la inercia de la endolinfa del interior del canal determina que el líquido quede rezagado con respecto a la pared del conducto, desplazada sincrónicamente con la cabeza. El líquido presiona entonces contra la cúpula, cuya consistencia blanda facilita su distorsión; simultáneamente se curvan los penachos ciliares, también en sentido opuesto a la aceleración angular del sistema.

El caracol o conducto coclear, sexto órgano del oído interno, tiene forma de tubo incurvado en espiral. Alberga unas 15.000 células ciliares, que son sensibles a sonidos, dentro de una gama de frecuencias que va desde algunas decenas de hertz (ciclos por segundo) hasta unos 20 kilohertz. Las células ciliadas se ordenan en serie sobre un delgado tabique, la membrana basilar, que también se curva siguiendo el trayecto de la espira coclear. En el caracol, los sonidos naturales, integrados por muchas frecuencias, se descomponen en cada una de ellas, que a su vez excitan la porción que les corresponde de las 15.000 células ciliadas ubicadas en la membrana basilar.

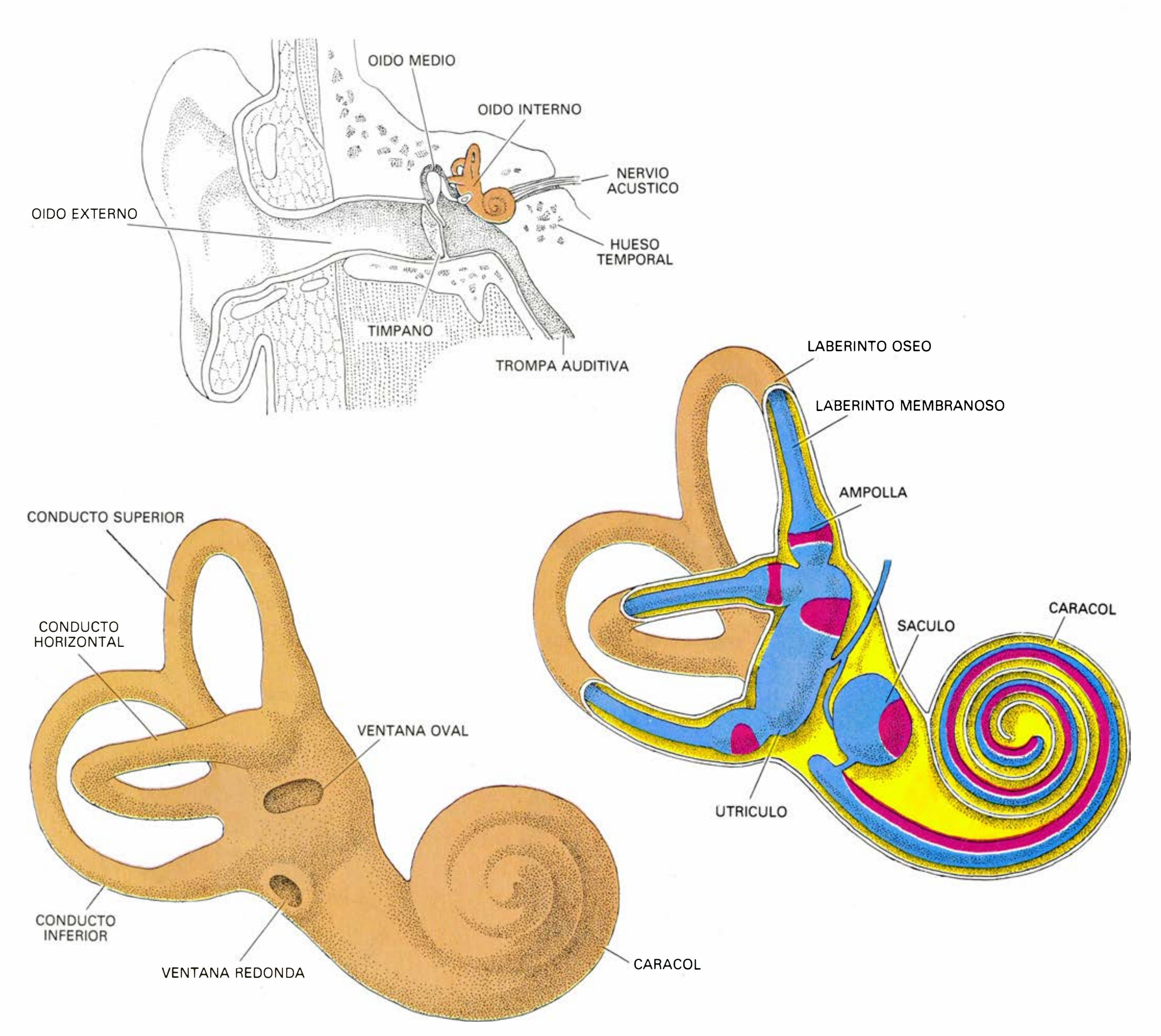
El funcionamiento de la cóclea, muy complejo, se escapa de nuestro propósito. Recordemos que está todavía por llegar un conocimiento adecuado de su mecanismo íntimo y es objeto de debate. En paralelo con lo que ocurre en el utrículo, sáculo y conductos semicirculares, el estímulo que llega a la célula ciliada coclear se convierte también en un desplazamiento de su hacecillo de cilios. Aquí bastará considerar de qué modo las oscilaciones sonoras de presión diferencial se convierten, en el oído interno, en una fuerza aplicada al hacecillo ciliar.

Las ondas sonoras que llegan al oído externo inciden sobre el tímpano membranoso, o tambor auditivo. El movimiento timpánico se comunica a los tres huesecillos del oído medio: martillo, yunque y estribo (malleus, incus y stapes). El más próximo al oído interno (estribo) produce un efecto de pistón que hace vibrar la membrana basilar, sobre la cual descansan las células ciliares que constituyen el órgano auditivo de Corti. Los hacecillos ciliares se insertan por su extremo distal en una estructura llamada membrana tectoria, situada cerca de, y paralela a, la mem-

brana basilar. Ambas membranas, basilar y tectoria, se mueven como sobre goznes con distinto eje, de tal modo que el desplazamiento hacia arriba bajo la influencia del estribo es simultáneo con movimientos en tijera de ambas membranas. Estos movimientos son los que desplazan los penachos ciliares.

El esquema simplificado que antecede pone de manifiesto que el funcionamiento de todos los órganos del oído interno comienza por un estímulo (aceleración o sonido) que se transforma en fuerza aplicada sobre el hacecillo ciliar. Hay que tener en cuenta que la respuesta de la célula ciliar es una señal eléctrica que se propaga luego por una fibra nerviosa hacia el cerebro. Por tanto, el nudo del problema está en descubrir el modo de conversión del desplazamiento del hacecillo en respuesta eléctrica. Una interpretación completa del proceso requiere sin duda una experimentación sobre el oído interno intacto de los mamíferos. Varias dificultades se interponen sin embargo a este tipo de acceso a las células ciliadas de órganos sensoriales. El hueso temporal, en el que se encuentra incluido el laberinto, es extremadamente duro; las células ciliadas de los mamíferos se muestran particularmente sensibles a la privación de flujo sanguíneo; son al mismo tiempo muy pequeñas y difíciles de manejar con microelectrodos; por último, es difícil averiguar, a la llegada de estímulos naturales al oído, cuál pueda ser el estímulo que alcanza el hacecillo ciliar y lo afecta específicamente.

Por todos los motivos indicados ha sido frecuente la utilización de animales



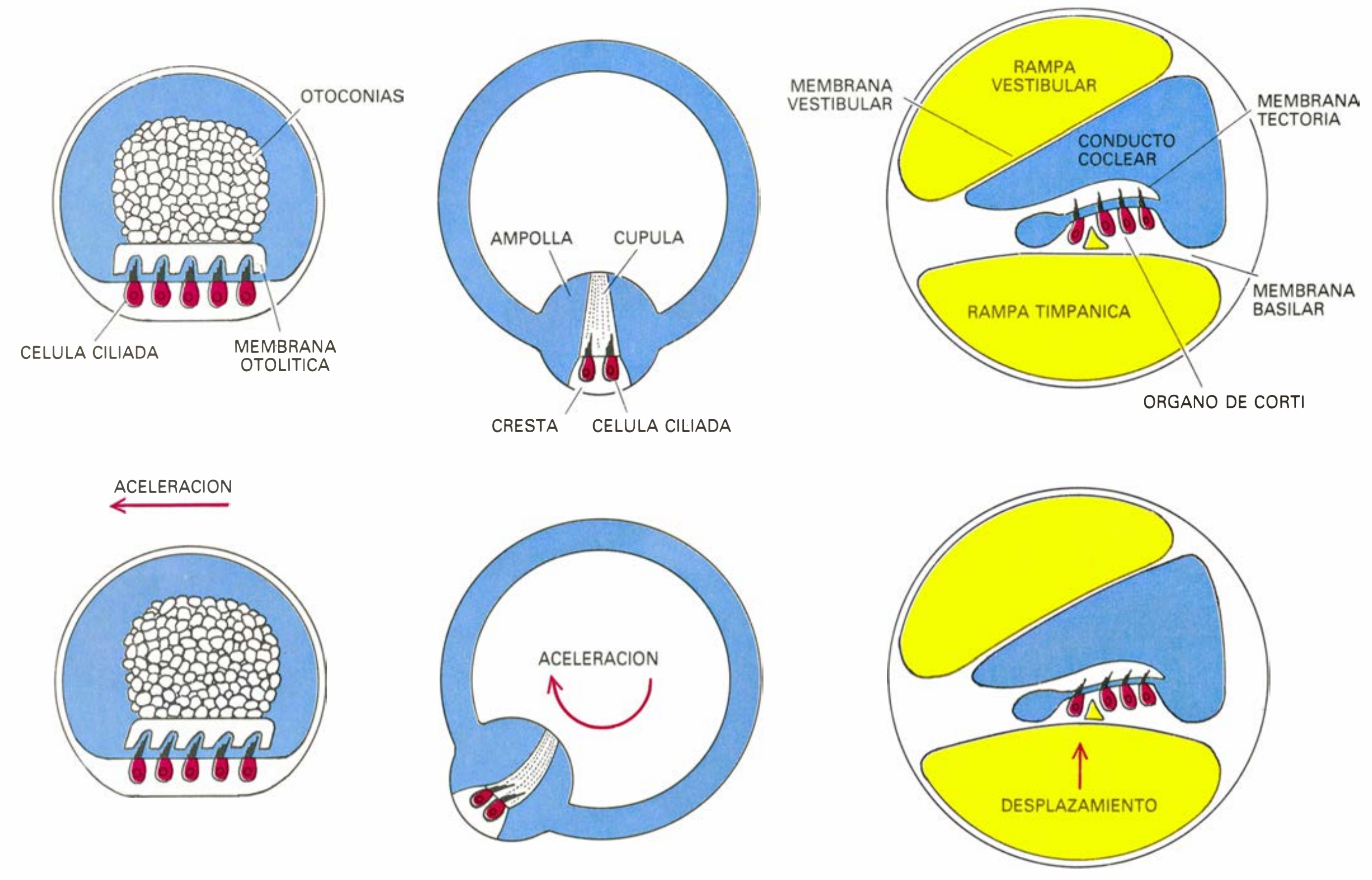
6. EN EL OIDO INTERNO HUMANO se alojan seis pequeños órganos sensoriales provistos de células ciliadas. Los conductos semicirculares miden la aceleración angular; el utrículo y el sáculo detectan la aceleración lineal; el caracol es el órgano auditivo. El dibujo superior muestra una sección a través del hueso temporal, donde se halla el oído interno, al que, por su forma, se le conoce también por laberinto. Los sonidos que inciden sobre el tímpano se propagan al caracol a través de tres huesecillos del oído medio: martillo, yunque y estribo. El dibujo inferior izquierdo muestra el laberinto como si hubiese sido extraído del temporal con una delgada capa de hueso a su alrededor, el laberinto óseo. Los tres tubos en forma de rosquilla que quedan a la izquierda son los conductos, o canales, semicirculares. La estructura en espiral, a la derecha, es la cóclea, o caracol. El dibujo derecho muestra el laberinto óseo abierto para revelar el laberinto membranoso, constituido por los órganos sensoriales. Cada órgano es una bolsita epitelial llena de líquido, la endolinfa (*azul*). Entre la bolsita y el hueso hay otro líquido, llamado perilinfa (*amarillo*). Las células ciliadas se acumulan en pequeñas placas (*rojo*). Los agregados de los conductos semicirculares se sitúan en la región llamada ampolla. En la cóclea yacen sobre una membrana que se adapta a la forma del órgano.

inferiores (peces, lagartos, ranas, tortugas) siempre que se ha intentado una preparación de células ciliadas. Las del oído interno de los anfibios son de cuerpo resistente y relativamente grande. Ello ha permitido la realización de experimentos que no habían podido ensayarse hasta ahora con las células ciliadas de mamíferos. Buena parte de mi propio trabajo se ha desarrollado sobre las del oído interno de la rana toro americana (*Rana catesbeiana*), extirpando el sáculo y despojando su membrana otolítica para dejar a la vista la capa epitelial que contiene las células ciliadas.

Se introduce el preparado epitelial en una solución fisiológica (semejante a los líquidos internos del organismo vivo) sobre la platina del microscopio. Se inserta un microelectrodo a través del polo apical de una célula ciliada, hasta su espacio interior; y una microsonda entre el quinocilio y los estereocilios adyacentes, al objeto de poder desplazar, en uno u otro sentido opuesto, el penacho ciliar. El control del desplazamiento por la microsonda se efectúa mediante un aparato de palanca manual o por ordenador. En cualquier caso, el desplazamiento del penacho ciliar está asegurado con gran precisión y puede observarse a través del microscopio. El microelectrodo recoge el potencial eléctrico en el interior de la célula, así como los cambios del mismo que acompañan a los movimientos del hacecillo ciliar.

Para comprender los cambios eléctricos de la célula ciliada, originados por los movimientos de su penacho ciliar, es necesario tener antes alguna idea sobre las propiedades eléctricas de la célula intacta, sin perturbación alguna. Al igual que cualquier otra membrana viva, el plasmalema de la célula ciliada es selectivamente permeable, permitiendo la entrada de unas moléculas y excluyendo otras. Además, esta permeabilidad puede variar de acuerdo con la apertura o con el cierre de canales selectivos. Cuando estos últimos se abren, entran en la célula determinados iones (átomos o moléculas que han perdido o ganado electrones y tienen por tanto una carga eléctrica). Mediante apertura y cierre de estos canales la célula puede regular su potencial eléctrico en relación a su ambiente.

Procesos de bombeo molecular, a cargo de la membrana celular, mantienen una concentración iónica interna diferente de la que conservan los líquidos circundantes. La más investigada de estas bombas es aquella que reduce la concentración de iones sodio en el interior celular. Estos iones tienen una sola carga eléctrica positiva y, puesto que su concentración es menor dentro que fuera de la célula, el interior de esta última tiene un potencial negativo respecto al del microambiente. La diferencia de potencial entre la célula y el líquido que la rodea se interpreta como



7. DESPLAZAMIENTO DEL PENACHO CILIAR. Constituye el estímulo que alcanza a la célula ciliada en los tres tipos de órganos sensoriales del oído interno. Se muestra aquí el desplazamiento del hacecillo ciliar en el utrículo y sáculo (*izquierda*), conductos semicirculares (*centro*) y cóclea (*derecha*). En el utrículo y sáculo los hacecillos ciliares se insertan en una urdimbre de moléculas proteicas, la membrana otolítica, sobre la que descansan, apilados, unos cristales llamados otoconias, mucho más densos que la endolinfa del órgano. Cuando la cabeza experimenta una aceleración, los cristales se rezagan con respecto al fluido. El retraso se comunica al hacecillo ciliar a través de la membrana otolítica. El estímulo que llega a la célula ciliar consiste, por tanto, en un desplazamiento del hacecillo en sentido opuesto al de la aceleración. En los canales semicirculares yacen los hacecillos en un promontorio llamado cresta y se insertan en una cubierta gelatinosa, la cúpula, que se extiende por la ampolla. Cuando gira la cabeza, la endolinfa del conducto se rezaga con respecto al epitelio de la cresta ampular. El líquido rezagado empuja e inclina la cúpula, que flexiona los hacecillos. En el caracol, las células ciliadas yacen sobre la membrana basilar y sus penachos se insertan en la membrana tectoria. Cuando el estribo se mueve hacia el oído medio, ambas membranas se desplazan hacia arriba. Puesto que las membranas giran sobre ejes diferentes, se produce un movimiento en tijera que flexiona los hacecillos.

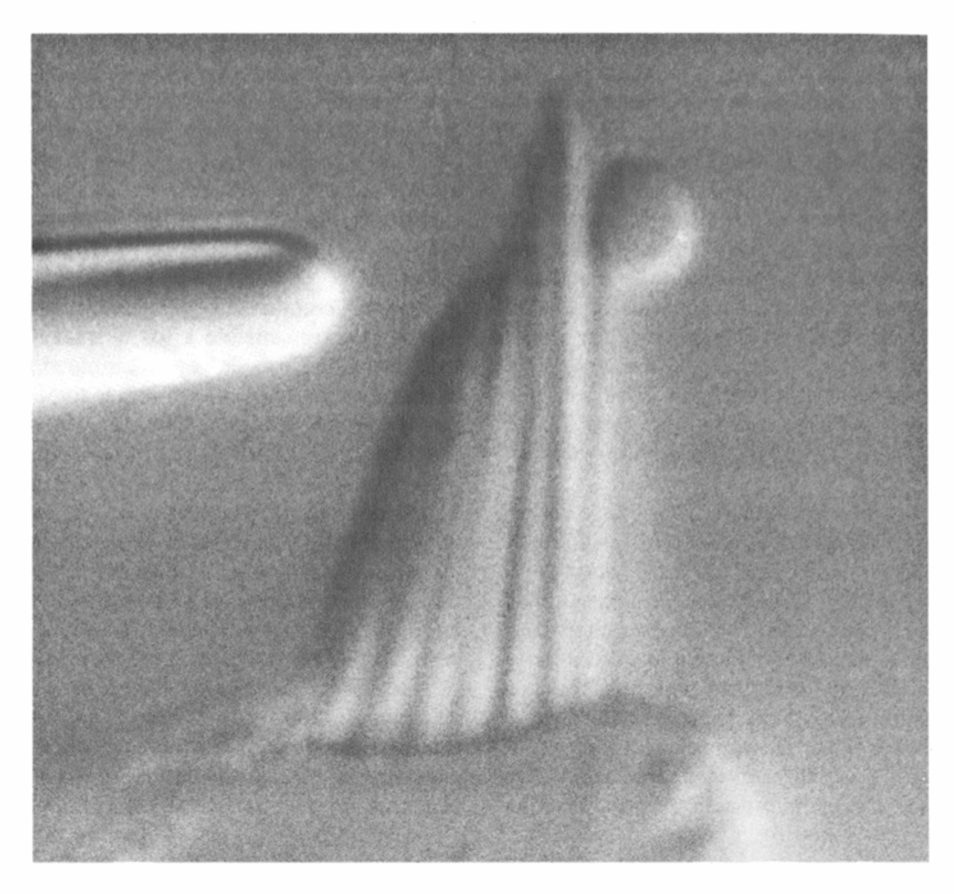
potencial de membrana, ya que representa una caída de dicho potencial a través de esta última. Hay que tener en cuenta que, si una célula tiene un potencial negativo, su interior ejercerá una atracción frente a iones cargados positivamente. Cuando los canales para tales iones se abren, los iones se precipitan hacia el interior celular, reduciendo de este modo el potencial de membrana.

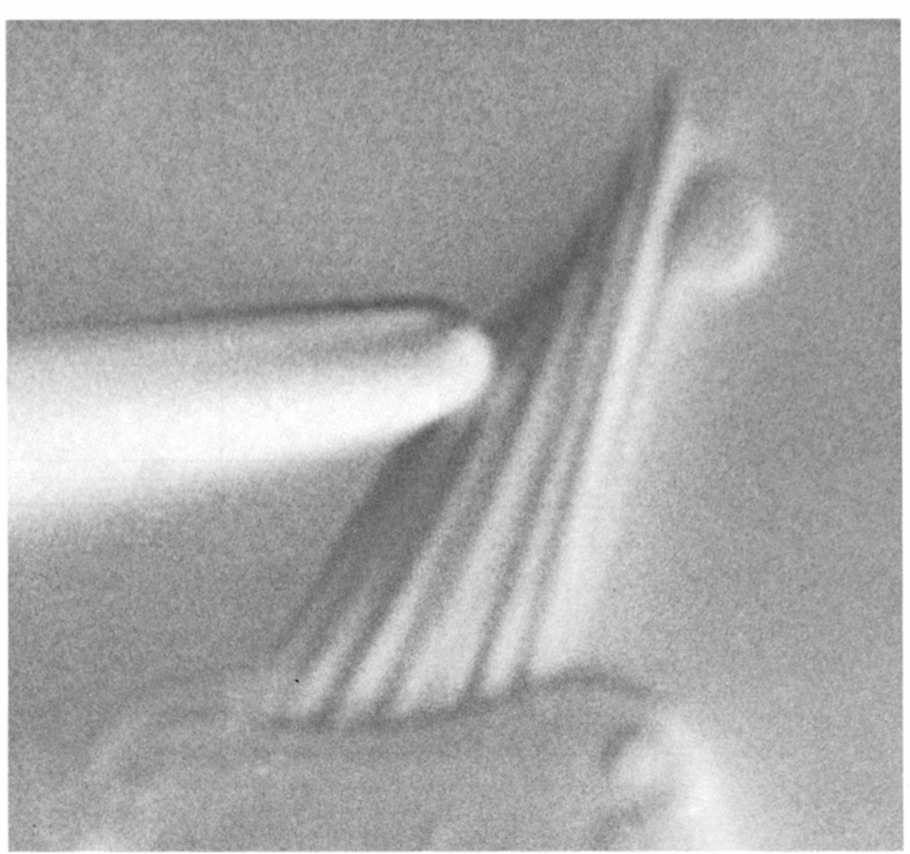
La membrana celular actúa por consiguiente como un acumulador, esto es, como una delgada lámina separadora de cargas eléctricas con signo opuesto. Una propiedad de los acumuladores es el poder generar una diferencia de potencial separando muy pocas cargas. Por añadidura, el paso de sólo unos pocos cuerpos cargados de un lado a otro de la placa puede alterar considerablemente la caída de potencial a través del condensador.

Las propiedades eléctricas de casi todas las neuronas están reguladas mediante contacto con el fluido exterior; la membrana actúa en esas células a modo de condensador. En la célula ciliada es más compleja la situación. Según ya se ha indicado, la ciliada separa la endolinfa de la perilinfa. La primera está en contacto con la superficie apical de la célula, a partir de la cual surge el hacecillo ciliar. La concentración de iones positiva y negativamente cargados, en la endolinfa, es semejante a la del interior celular, alta en iones potasio y baja en iones sodio. Por tanto, si la célula estuviera sólo en contacto con la endolinfa, no hab·ía caída de potencial a través de la membrana.

La superficie basal de la célula ciliada está en contacto con la perilinfa y esta última tiene una composición totalmente diferente de la del interior celular. En la perilinfa es mucho más alta la concentración de iones sodio y, mucho más baja, la de iones potasio. Si la célula estuviera en contacto solamente con la perilinfa, la diferencia de potencial entre el interior y el exterior celulares sería importante, puesto que el interior estaría unos 90 milivolt por debajo del fluido exterior.

Ambas superficies, apical y basal, de la célula ciliada operan como condensadores. El potencial de membrana de la célula en su conjunto está por tanto mediatizado por ambas áreas polares, aunque la contribución que cada una de ellas aporta no es de la misma magnitud. Las dos superficies tienen canales de paso iónico. Cuando la membrana está en reposo, libre de toda perturba-





8. MICROSONDA DE VIDRIO empleada para desplazar el hacecillo ciliar en la técnica utilizada por el autor. La micrografía superior muestra una célula ciliar no perturbada, aislada del sáculo de la rana toro americana (*Rana catesbeiana*). En la inferior, la pipeta ha desplazado el hacecillo. El movimiento provoca cambios en las propiedades eléctricas de la célula, que, en el trabajo del autor, se median con un pequeño electrodo insertado a través de la superficie apical celular; el electrodo no aparece aquí. Estas imágenes al microscopio óptico se tomaron mediante la técnica de contraste diferencial-interferencial, que aprovecha las diferencias del índice de refracción para visualizarlas como regiones claras u oscuras.

ción, quedan siempre unos pocos canales abiertos y se da un pequeño flujo de iones positivamente cargados a través de la membrana. La contribución de cada área, apical o basal, al conjunto del potencial de membrana viene determinada por la permeabilidad de tales áreas, es decir, por el número de canales que se abren. Cuando la membrana está en reposo, la permeabilidad del área basal es sustancialmente mayor que la del área apical. Por esta razón, el potencial de membrana de la célula ciliada en reposo está más cerca de −90 que de 0 milivolt; es de unos −60 milivolt.

Si el electrodo de registro se inserta en el interior de una célula ciliada del sáculo de la rana toro, obtenemos un nivel de potencial de −60 milivolt. Sin embargo, si con ayuda de la micropipeta se desplaza el hacecillo ciliar a lo largo del eje de simetría bilateral, hacia el quinocilio, la diferencia de potencial se reduce a −40 milivolt. Esta disminución de la diferencia de potencial a través de la membrana se conoce como despolarización. Cuando el hacecillo se desplaza sobre el mismo eje y en sentido opuesto, se registra un cambio muy distinto: una subida de −60 a −65 milivolt, es decir, una hiperpolarización. El desplazamiento en una dirección perpendicular al eje de simetría, en cualquiera de sus dos sentidos, no ocasiona cambio alguno del potencial de membrana.

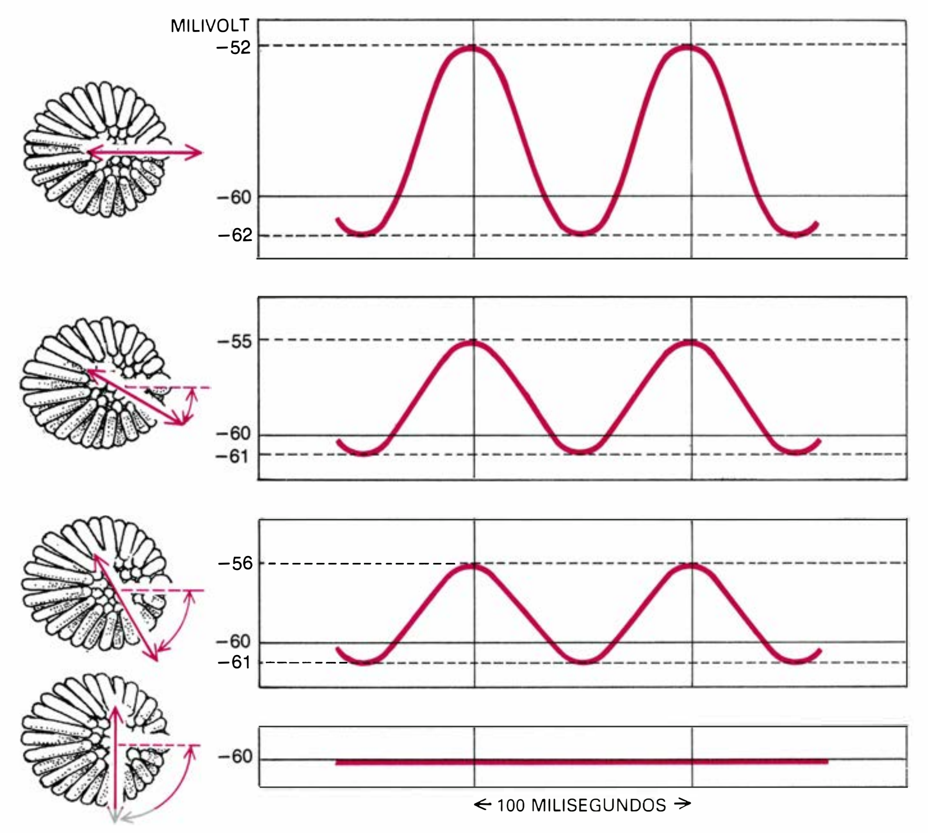
La célula ciliada es, por tanto, específicamente sensible a los desplazamientos a lo largo del eje de simetría bilateral de su hacecillo ciliar; y totalmente insensible a los desplazamientos en sentido perpendicular a dicho eje. Desplazando el hacecillo en cualquiera de los dos sentidos opuestos de un eje intermedio se demuestra que la célula ofrece una gran sensibilidad direccional, confirmándose la interpretación dada por Otto Lowenstein, de la Universidad de Birmingham, y Jan Wersäll y Åke Flock, del Hospital Karolinska de Estocolmo, a sus registros extracelulares. En los desplazamientos del hacecillo según ejes intermedios se comprueba que, cuanto más se aproxima el eje explorado al de simetría bilateral, tanto más intensa es la respuesta obtenida. El hacecillo logra descomponer cualquier estímulo direccional en dos componentes, según los dos ejes de máxima y mínima respuesta, el de simetría bilateral y el perpendicular al mismo. Según el primero, la célula responde con despolarización o con hiperpolarización, dependiendo del sentido direccional del desplazamiento. Según el eje perpendicular, no hay respuesta.

La sensibilidad direccional de la célula ciliada tiene una importancia considerable en el aspecto sensorial. Ello implica que, mientras un solo receptor puede suministrar información de magnitud para tan sólo un componente del estímulo, un grupo de células ciliadas con sus apropiadas sensibilidades puede en cambio suministrar estimaciones precisas sobre una aceleración en cualquier dirección. Pese a la manifiesta utilidad de la información direccional, desconocemos su mecanismo.

Nos hallamos ante un fenómeno desconcertante, habida cuenta de la microanatomía del hacecillo ciliar. Los estereocilios son simétricos respecto a su eje longitudinal, y pudiera en principio pensarse que la inclinación de un cilio en cualquier dirección resultase en la misma respuesta. El quinocilio tiene, por contra, un plano de simetría bilateral, coincidente con el mismo plano en el hacecillo; pero no es este cilio el responsable de la sensibilidad direccional de la célula. Téngase en cuenta, por ejemplo, que el quinocilio desaparece espontáneamente durante el desarrollo embrionario de la cóclea de los mamíferos. Puede también extirparse de las células ciliadas del sáculo en la rana toro, sin que se altere la direccionalidad de la respuesta celular.

Tres hipótesis se pueden considerar respecto a la respuesta direccional. El estereocilio podría tener una asimetría en su plano transversal, todavía no detectada con microscopía electrónica. La compleja disposición geométrica de los cilios en el hacecillo pudiera conferir direccionalidad a un conjunto de estructuras, careciendo de ella sus elementos aislados. También podría ser que la respuesta direccional descansara en las propiedades de la superficie apical de la célula y no en el hacecillo.

Aunque se desconozca la base anatómica de la direccionalidad, ello no ha impedido que se intente explicar el mecanismo que induce, en una célula ciliada, a todo un complejo de cambios eléctricos. Ya se ha indicado que el potencial de membrana en reposo, de −60 milivolt, viene determinado por el cociente de permeabilidad entre las áreas apical y basal de la membrana.



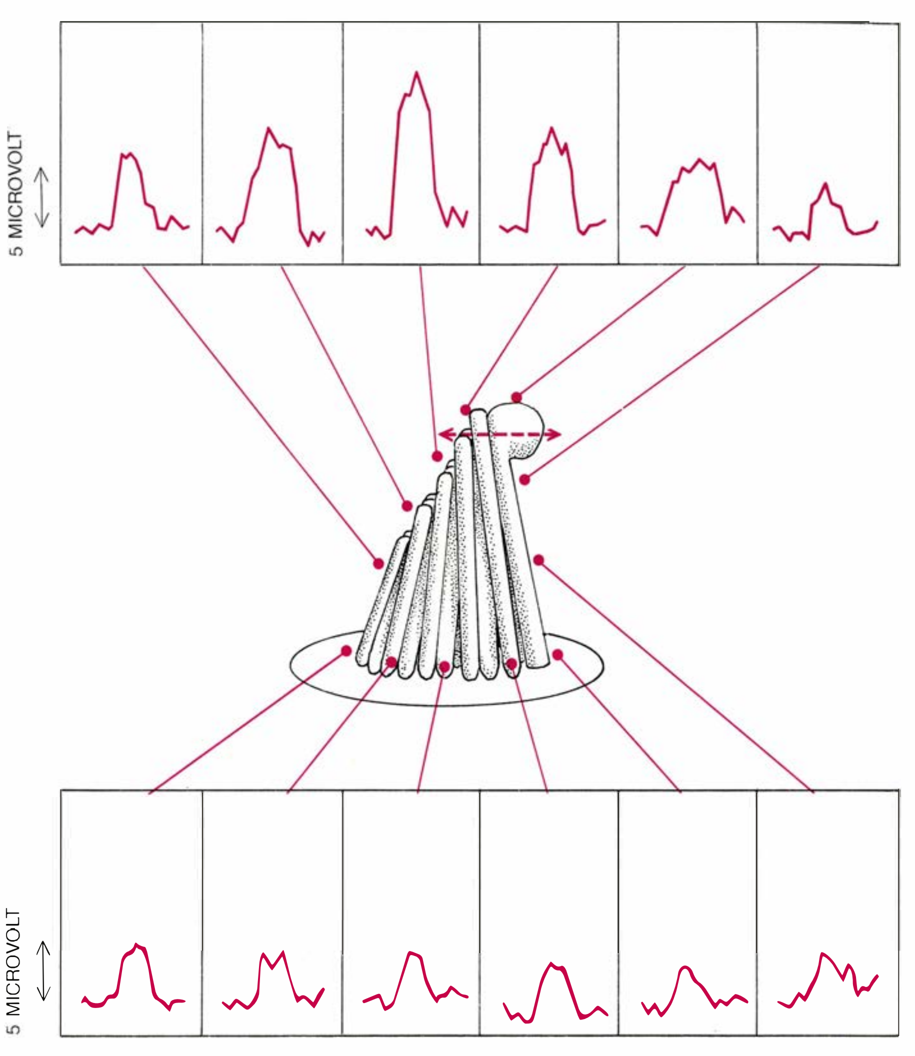
9. SENSIBILIDAD DIRECCIONAL de la célula ciliada. Se muestra en trazados de registro con un electrodo insertado en un receptor aislado, del sáculo de la rana toro, efectuados en el momento en que el penacho ciliar se desplazaba. Los valores corresponden a registros tomados por Sandra L. Shotwell en el laboratorio del autor. Cuando la célula está en reposo, su interior tiene un potencial eléctrico de 60 milivolt por debajo del potencial del líquido circundante. Si el penacho se desplaza hacia el quinocilio, a lo largo del eje de simetría bilateral, la diferencia de potencial se reduce a −52 milivolt (*arriba*). Si el penacho se desplaza en sentido contrario al quinocilio, sobre el mismo eje, la diferencia aumenta a −62 milivolt. Cuando la dirección del desplazamiento no coincide con el eje de simetría, la amplitud de las respuestas disminuye. La célula no responde a desplazamientos perpendiculares al eje de simetría (*abajo*).

Ello sugiere que dicho potencial podría muy bien modificarse cambiando la permeabilidad en una de estas dos áreas, dejando intacta la otra. Se produciría según esto una hiperpolarización (aumento del cociente) cuando se aumentase la permeabilidad de una de las áreas; y una despolarización (disminución del cociente) al disminuirla.

Mis resultados, así como los de otros investigadores, apoyan en principio esta teoría sobre el cambio de potencial de membrana en la célula ciliada. Ya hemos visto anteriormente que siempre hay algunos canales abiertos para los iones, pero con mayor abundancia en el área basal que en la apical. Cuando el extremo final del hacecillo ciliar se mueve hacia el quinocilio, en el eje de simetría bilateral, se abren canales supletorios en el área apical. Iones con carga positiva son atraídos por el potencial negativo de la célula, precipitándose hacia su interior a través de la membrana. El aumento de permeabilidad apical incrementa la contribución de este área al potencial de conjunto de la membrana, disminuyendo la diferencia con la zona basal y cayendo a −40 milivolt. Cuando el hacecillo se desplaza en sentido contrario sobre el mismo eje, tendiendo a alejarse del quinocilio, se cierran rápidamente algunos canales de los que están abiertos en reposo, disminuye la contribución de la zona apical y aumenta la diferencia con la apical hasta −65 milivolt.

Los "canales de transducción" del área apical, responsables del cambio de potencial, no parecen muy selectivos. Cuando se abren, permiten la entrada de las sustancias con mayor carga positiva, de un diámetro de hasta 0,6 nanómetros (milmillonésimas de metro). El potasio parece ser el ion positivo más importante en la endolinfa y principal portador de carga eléctrica a través de la membrana. Experimentalmente se ha demostrado que, si bien puede reemplazarse por otras sustancias portadoras de corriente, el potasio es, probablemente, el portador principal en una célula libre de manipulación.

Hasta ahora no se han identificado de modo definitivo las moléculas que posibilitan el flujo de corriente a través de la membrana; por ello, es difícil especificar exactamente la localización de los canales de transducción, aunque pueden obtenerse pruebas indirectas. Cuando los canales se abren, fluyen pequeñas corrientes eléctricas por el líquido que rodea a la célula y a través de la membrana. Un electrodo de registro



10. PATRON DE CORRIENTES ELECTRICAS en el fluido que rodea a la célula ciliada. Nos indica que los canales que intervienen en la respuesta eléctrica de la célula se ubican cerca del extremo distal del hacecillo. Las alteraciones del potencial eléctrico de la célula ciliada se deben al flujo de iones positivos hacia el interior celular, a partir de la endolinfa circundante; estos iones resultan atraídos por el potencial negativo del interior de la célula. El ion principal es el potasio, cuyo flujo va unido al potencial eléctrico del receptor y está regulado por la apertura y cierre de "canales de transducción" de la membrana celular. Cuando estos canales se abren y penetran iones potasio en la célula, se produce una pequeña corriente en la endolinfa próxima a los canales. Se muestran aquí las mediciones de voltaje de esta corriente efectuadas en varios puntos del contorno sobre el hacecillo ciliar. Las corrientes de mayor magnitud llega hasta unos 13 microvolt (millonésimas de volt). Puesto que las corrientes más intensas se detectan cerca del extremo distal del hacecillo, cabe suponer que ahí están los canales de transducción.

puede medir dicha corriente en varios puntos alrededor del perímetro del penacho ciliar, mientras los cilios se están moviendo. En el líquido circundante, la corriente es máxima en el extremo distal del penacho, cerca de las puntas de los estereocilios; sugiere ello que la inflexión del hacecillo abre canales, pero no en la base de los cilios desviados, sino cerca de sus extremos distales, posiblemente muy cerca del nivel donde los cilios se conglutinan. Tal conclusión, todavía provisional, precisa un mayor ahondamiento en el tema para que pueda aceptarse sin reservas.

Los registros eléctricos de células ciliadas demuestran que la respuesta inicial del receptor es extremadamente rápida. Puesto que el sistema auditivo de algunos vertebrados, murciélagos y ballenas entre ellos, puede detectar tonalidades con frecuencias de hasta 100 kilohertz, el aparato de transducción debe funcionar también muy aprisa. Registros tomados con el oído interno aislado confirman esta deducción. Las células ciliadas del oído de la rana toro responden a sonidos con frecuencias no superiores a tres kilohertz; pero tales células inician la respuesta tras un intervalo de pocas decenas de microsegundos (millonésimas de segundo). Por tanto, la apertura de los canales de transducción, como inicio de la respuesta celular, supone un lapso de tiempo sensiblemente igual al de procesos moleculares tales como la acción de un enzima. No es probable que medien muchos pasos entre la aplicación de la fuerza al hacecillo y el comienzo de la

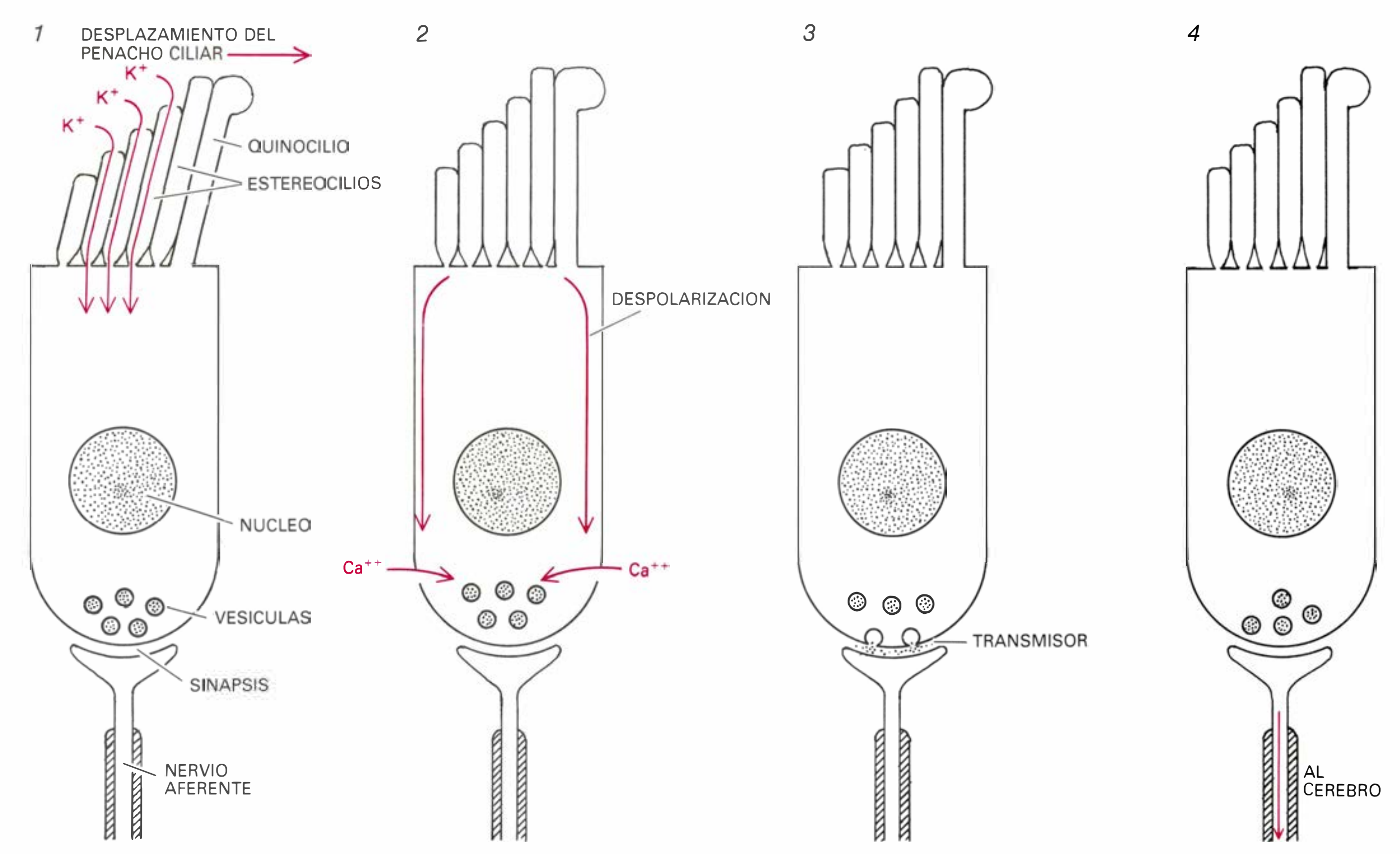
respuesta celular; más bien diríase que la fuerza mecánica actúa directamente sobre el canal de transducción.

Para obtener una respuesta de la célula ciliar basta con un desplazamiento muy pequeño de su hacecillo. Las células ciliares de lagartos y tortugas inician la respuesta cuando el penacho recorre un trayecto de tan sólo 340 picometros. Se estima que el umbral es aún más bajo, de 100 picometros, en el caracol de los mamíferos. Los registros sobre células ciliadas del sáculo de la rana toro demuestran que la gama completa de la respuesta celular se extiende hasta más allá de una desviación de 0,5 micras. Puesto que en este ejemplo la longitud del penacho es de 82 micras, la respuesta completa requiere solamente una inflexión de tres grados.

Parece probable que un estímulo amplio y continuo, como el de una rápida aceleración, desvíe los estereocilios mucho más de tres grados. La célula daría entonces una respuesta fuerte y sostenida. Pequeños cambios posteriores en el estímulo, a partir del alto nivel inicial, no alterarían la respuesta celular. Tal patrón de conducta sería poco conveniente para el organismo, puesto que dichos cambios pequeños tienen potencialmente una significación mayor que el estímulo intenso y duradero.

Sin embargo, se ha comprobado en el sáculo de la rana toro que no existe tal "saturación" sensorial. Si se somete a prueba una célula ciliada aislada de esta localización, en condición previa de reposo, se verifica una máxima sensibilidad frente a desplazamientos de algunas decenas de micra en cada dirección. Si se empuja al hacecillo a una nueva posición de reposo, por ejemplo a una micra de la primera posición, no se produce una respuesta amplia y duradera, sino que, décimas de segundo después, disminuye la respuesta al desplazamiento estático de una micra; y la célula se hace sensible a pequeños movimientos que la desplacen de su nueva posición de reposo. Se ignora la base de esta adaptación, pero su significación es evidente: permite que el organismo prescinda de estímulos amplios y continuados, al paso que se mantiene una gran sensibilidad frente a pequeños impactos sensoriales, que son de importancia mayor.

Las respuestas de la célula ciliada aislada causan asombro en su mecanismo molecular, capaz de reaccionar a estímulos que se presentan con una amplitud de picometros y una frecuencia de hasta 100.000 veces por segundo. Los mecanismos utilizados por la apertura o cierre de los canales de transducción se analizan actualmente en mi laboratorio del Instituto de Tecnología de California y en otros centros. Una hipótesis plausible es que los canales están en un continuo abrir y cerrar por movimientos térmicos aleatorios de moléculas próximas. De ser así, la fracción de canales abiertos en un momento dado dependerá de la diferencia en nivel de energía entre un canal cerrado y otro abierto. Si la diferencia es mayor que la energía cinética del promedio de colisión con una molécula cercana, la apertura será un acontecimiento raro y, en cualquier momento, la mayor parte de los canales estarán cerrados. Si los ni-



11. RESPUESTA DE UNA CELULA CILIADA, ilustrada aquí esquemáticamente. Culmina en la transmisión de una señal eléctrica hacia el cerebro, a lo largo de una fibra nerviosa aferente que comienza en la base de la célula. Al desplazarse el hacecillo ciliar se abren los canales de transducción (*1*). Iones potasio fluyen hacia el interior celular y desciende la diferencia de potencial entre la célula y el líquido circundante. La reducción de esa diferencia de potencial se llama despolarización y se propaga, casi instantáneamente, por toda la célula (*2*). En el polo inferior de esta última existen canales que admiten selectivamente iones calcio y se abren con la despolarización, fluyendo esos iones al interior. Cerca de la base celular hay vesículas repletas de la sustancia neurotransmisora, que transmite el impulso nervioso de una célula a otra contigua. Los iones calcio producen una conglutinación de las vesículas con la membrana basal de la célula ciliada (*3*). Esta fusión es simultánea a la liberación del neurotransmisor contenido en las vesículas. El transmisor, cuya naturaleza química se desconoce, difunde por la hendidura sináptica que queda entre la célula ciliada y la neurona. Esta última se excita y propaga un mensaje hacia el cerebro, a lo largo de una fibra del octavo par craneal (*4*). Por su función, las células ciliadas pueden considerarse paraneuronas.

veles de energía de canales cerrados y abiertos son similares, un 50 por ciento aproximado de canales estarán abiertos en cualquier momento.

Supongamos que se parte de un nivel de energía relativamente grande para un canal abierto en el área apical de la membrana de la célula ciliada. En ese caso, la mayor parte de los canales estarán cerrados. Si el desplazamiento del hacecillo reduce de algún modo la energía del canal abierto, la fracción de canales abiertos aumentará rápidamente bajo la influencia del movimiento de moléculas próximas. David Corey, que hoy se encuentra en la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, cuando trabajaba en mi laboratorio tomó registros de células ciliadas; sus resultados concordaron con esta hipótesis. El problema crucial, aún sin resolver, es cómo se desarrolla el movimiento del hacecillo hasta alterar el nivel de energía del canal.

Tras repasar cuanto se sabe sobre el mecanismo de transducción de la célula ciliada, surge el problema inmediato del modo en que las alteraciones del potencial provocan el envío de un mensaje al cerebro. Las células ciliadas carecen de axón; por tanto, no pueden enviar directamente información alguna. El mensaje lo transporta de hecho una neurona provista de una terminación junto a la superficie basal del receptor. Cuando se abren los canales de la célula ciliada, la caída de potencial a través de la membrana se difunde muy aprisa por toda la célula. En el área basal de la membrana abundan los canales que admiten selectivamente iones calcio. La actividad de estos canales depende del voltaje y, en cuanto ocurre la despolarización, los canales se abren.

Tras su admisión en la célula, los iones de calcio desencadenan otro acontecimiento importante. Junto a la base de la célula ciliada se advierten multitud de vesículas repletas de una sustancia química que actúa como neurotransmisor. Los iones calcio provocan la fusión de las vesículas con la membrana exterior y el vaciado de su contenido hacia la hendidura sináptica, que separa la célula ciliada de la terminación neuronal.

No se conoce la composición química exacta de la sustancia transmisora. Pero se sabe que, cuando la molécula transmisora queda libre, fuera de la vesícula, se difunde a través de la hendidura sináptica, lo que supone un recorrido de unos 20 nanómetros. Cuando el transmisor se combina con receptores de membrana de la terminal nerviosa, se produce una despolarización en la neurona, análoga a la que se ha producido en la célula ciliada. La despolarización neuronal origina uno o varios "potenciales de acción", las señales eléctricas que se propagan a lo largo del axón.

Un efecto opuesto tiene lugar en la hiperpolarización de la membrana de la célula ciliada. Incluso en situación de reposo están abiertos algunos canales de calcio en la base de la célula; en consecuencia, existe siempre difusión de una pequeña cantidad de transmisor a través de la sinapsis y una señal de pequeña magnitud se transporta hacia el cerebro. La hiperpolarización cierra estos canales y reduce la cantidad de transmisor liberado. Así disminuye la frecuencia con que se producen potenciales de acción en la neurona, y es esta reducción la que equivale a una señal portadora de información, en la lógica del sistema nervioso.

La información que parte de todas las células ciliadas del oído interno se transporta al cerebro por axones del octavo par craneal. Cada una de las numerosas fibras del nervio propaga señales procedentes de células ciliadas de un solo órgano, y es, además, vehículo de información específica. Así, por ejemplo, una determinada fibra de un canal semicircular se excita solamente con aceleraciones angulares respecto a un eje concreto de la cabeza; y en un sentido direccional también concreto (en el sentido del movimiento de las agujas del reloj, o en el inverso).

No sólo llegan mensajes desde la célula ciliada hasta el cerebro. También éste los envía a la célula ciliada. Junto a la base celular se aposentan dos clases de fibras nerviosas: aferentes, que llevan información al cerebro, y eferentes, que la portan en sentido opuesto, hasta la célula ciliada. Cuando se activan estas últimas fibras en el caracol auditivo, las células ciliadas parecen hacerse menos sensibles a los sonidos, así como disminuir su ajuste perfecto a tonos de ciertas frecuencias. No está claro cuál sea el mecanismo de esta desensibilización, uno de los muchos misterios que envuelven todavía a la célula ciliada. Se trabaja actualmente en muchos laboratorios y, dentro de pocos años, se dará sin duda respuesta a bastantes problemas; quién sabe si no se resolverá el mismo problema central del mecanismo de transducción. En todo caso, los trabajos futuros no dejarán de depararnos cada vez mayor asombro sobre la sensibilidad y complejidad de este aparato biológico en miniatura.

Ciencia y sociedad

Fusión nuclear

Las llamadas fuentes alternativas o complementarias de energía (solar, eólica, geotérmica, biomasa y otras) ofrecen un inmenso atractivo, mas, por su misma naturaleza, sólo podrán abastecer parcialmente la creciente demanda de energía. Se prevé que, en un futuro, la producción masiva de energía se basará en la fusión de los núcleos atómicos ligeros, mediante la cual dos núcleos se unen dando lugar a otro con mayor número másico y con una pérdida de masa del 1 al 3 por mil, que corresponde a una producción de energía de 24.000 a 72.000 kilowatt-hora por cada gramo de material fusionado. Actualmente, la fusión nuclear sólo se ha obtenido a escala del laboratorio y de modo incontrolado en las explosiones termonucleares. Recuérdese que las estrellas constituyen inmensos reactores de fusión nuclear: la energía solar es la energía de fusión del Sol.

Hay múltiples reacciones de fusión nuclear. Desde el punto de vista de su factibilidad tecnológica, la más importante es la que emplea los isótopos de hidrógeno, deuterio y tritio; desde el punto de vista de la contaminación ambiental, las más interesantes son las que emplean núcleos no radiactivos y que dan lugar a productos de fusión también no radiactivos, como sucede con algunas de las originadas por litio y boro. Los reactores de fusión nuclear de primera generación emplearán deuterio como combustible exógeno y el tritio como endógeno, mientras que los de segunda generación no contendrán ya materiales radiactivos.

El deuterio se encuentra en el agua del mar a razón de un átomo de deuterio por cada 6500 átomos de hidrógeno, o sea, con una concentración de 34 partes por millón (ppm), lo que supone unas 10^{13} toneladas de deuterio en los océanos, con un contenido energético de $2,6 \times 10^{24}$ kilowatt-hora. El coste actual del deuterio es de unos 60 dólares el kilo; por unidad de energía producida, su coste es del uno por cien al uno por mil del de los combustibles fósiles. El tritio, que no se encuentra en la naturaleza, puede obtenerse bombardeando el litio con neutrones. El litio se halla en la corteza terrestre en una concentración de unas 20 ppm y en el agua del mar en 0,17 ppm.

Según se desprende de todo lo anterior, la fusión nuclear posee inicialmente una serie de ventajas que justifican el esfuerzo empleado para su comercialización futura. Como resumen de ellas, se tiene: *1*) La energía producida en la fusión del deuterio contenido en un litro de agua de mar es equivalente a la energía producida en la combustión de 600 litros de gasolina. *2*) El deuterio se encuentra en el agua del mar en una cantidad tal, que manteniendo una tasa de crecimiento energético de 3,4 por ciento, duraría un tiempo superior al transcurrido desde que se formó la Tierra hasta nuestros días, o bien duraría un tiempo superior al que probablemente transcurrirá desde nuestros días hasta la desaparición de la vida sobre el planeta. *3*) El índice de riesgo radiobiológico (razón entre la actividad por watt térmico y la concentración máxima permitida en el aire) de una central de fusión nuclear de primera generación es del orden de la milésima parte del de una central con reactores de fisión nuclear reproductores rápidos. Las centrales de fusión nuclear de segunda generación no producirán contaminación radiactiva.

Pero estas importantes ventajas quedan atenuadas ante las enormes dificultades científicas y técnicas que hay que solucionar para satisfacer una serie de condiciones necesarias, pero no suficientes, para que un medio con deuterio y tritio, o con deuterio solo, funcione como un reactor productor de energía. Estas condiciones son: (*a*) Al igualar la energía producida en la fusión a la energía perdida, se obtiene que la temperatura del medio debe ser superior a la de ignición, de unos 45 millones de grados para el caso del deuterio y tritio y de diez veces más cuando sólo se emplea el deuterio. A estas temperaturas, los átomos están totalmente ionizados, constituyendo un plasma. (*b*) En la colisión del deuterio con el tritio, lo más probable es que se produzca una dispersión; por cada millón de dispersiones, ocurre una sola fusión, aproximadamente. Así pues, el medio debe estar confinado durante cierto tiempo para que el deuterio y el tritio tengan opción de colisionar suficiente número de veces, de suerte que algunas de ellas produzcan fusiones y, por tanto, energía. (*c*) Para que el medio funcione como un reactor productor de energía, con los rendimientos correspondientes, ha de cumplirse la condición de Lawson, según la cual el producto de la densidad del plasma en núcleos por centímetro cúbico y por el tiempo (en segundos) durante el cual el medio se mantiene confinado, debe ser mayor que 10^{14} para el caso de deuterio y tritio, y por encima de 10^{16} para el caso del deuterio solo.

Si tenemos presente que la temperatura de ignición y el parámetro de Lawson cuando se emplea como combustible una mezcla de deuterio y tritio son muy inferiores a cuando se utiliza sólo deuterio, entenderemos por qué los primeros reactores de fusión nuclear serán de deuterio y tritio.

El confinamiento de un plasma puede hacerse por dos métodos distintos: por confinamiento magnético y por confinamiento inercial.

El confinamiento magnético se basa en que los electrones e iones del plasma, en presencia de un campo magnético, describen trayectorias helicoidales alrededor de las líneas de fuerza de dicho campo. En un tubo con un arrollamiento eléctrico a su alrededor (solenoide) se producirá un campo magnético axial, y los electrones e iones del plasma se desplazarán siguiendo trayectorias helicoidales a lo largo del tubo. Para que el plasma no se escape del tubo pueden seguirse dos procedimientos: aumentar la intensidad del campo magnético en sus extremos, con lo que los electrones e iones del plasma se reflejarán parcialmente en los extremos del tubo, constituyendo el sistema un espejo magnético, o bien cerrando el tubo sobre sí mismo, en forma de un toro, el cual actúa como la única espira del secundario de un transformador, constituyendo de esta forma el sistema tokamak. También puede confinarse parcialmente el plasma en pozos magnéticos de configuraciones especiales. De este modo, con densidades de 10^{15} iones por centímetro cúbico el tiempo de confinamiento necesario debe ser superior a una décima de segundo.

El confinamiento inercial se basa en que, al incidir uniformemente sobre la superficie de una microbola (de un milímetro de radio), en cuyo interior hay deuterio y tritio (un miligramo), un haz de fotones de un láser, o un haz de electrones relativistas o de iones producidos en un acelerador de partículas, se producen una serie de procesos muy complejos cuyo efecto macroscópico es la ablación del material próximo a la superficie de la microbola. Este material de ablación se desplaza hacia fuera con un impulso centrífugo; debido a la conservación del impulso se producirá un impulso centrípeto sobre el resto de

la microbola. La variación temporal de este impulso centrípeto origina una fuerza y, por tanto, una presión centrípeta. Se genera así un tren de ondas de presión que van comprimiendo la microbola. Las condiciones óptimas se presentan cuando la compresión es isentrópica, es decir, cuando la microbola se comprime a elevadas densidades (miles de veces la densidad inicial), sin aumentar apreciablemente la temperatura (un millón de grados). Cuando las ondas de presión llegan a las proximidades del centro (a un micrometro) se amontonan y generan una onda de choque muy intensa que calienta bruscamente esta pequeña región central hasta temperaturas de fusión del orden de los 50 o 100 millones de grados; generando entonces una onda de ignición que se propaga al resto del deuterio y tritio, fusionándole. Macroscópicamente se produce la explosión de la microbola situada en el centro de una vasija (de unos cinco metros de radio) refrigerada por litio.

Las partículas producidas en la fusión (neutrones, partículas alfa, núcleos de deuterio y tritio sin fusionar y núcleos del material no fusible que contiene la microbola) interaccionan con la vasija; al hacerlo, producen la ablación de su pared interior, incrementando la entalpía del refrigerante y transmutando el litio en tritio, que se extrae para fabricar nuevas microbolas. La entalpía del refrigerante se transforma en energía eléctrica a través de un sistema convencional de generador de vapor, turboalternador y condensador.

Se han realizado ya numerosos experimentos de fusión por confinamiento magnético e inercial, que aunque no han alcanzado las condiciones necesarias, dadas anteriormente, para el funcionamiento de un reactor de fusión nuclear productor de potencia, permiten extrapolar los resultados obtenidos y prever que, con los fondos apropiados, se construirá el primer reactor demostrador de potencia antes del año 2000.

En el campo de los espejos magnéticos, los principales experimentos se realizan en el Laboratorio Nacional de Lawrence Livermore, en donde se ha construido el TMX-U basado en el TMX de 550 × 31 centímetros, con un parámetro de Lawson de 3×10^{11}. En fase de construcción está el MFTF, con el que se piensa sobrepasar los 10^{12}. En el campo de los tokamaks destaca el proyecto europeo JET, con un toro de 296 centímetros de radio y una sección recta de 125 × 210 centímetros con el que se intenta alcanzar un parámetro de Lawson de 5×10^{13}. El TFTR del Laboratorio de Princeton de 248 × 85 centímetros y con un parámetro de Lawson calculado de $1{,}6 \times 10^{13}$ es el primer tokamak de esta segunda generación que ha entrado en funcionamiento, obteniendo en el pasado mes de diciembre unos resultados coherentes con los proyectados, lo que ha supuesto una inyección de optimismo, tan necesaria en la actual crisis energética.

En el campo de la fusión por confinamiento inercial, destaca el Shiva, construido en el Laboratorio Nacional de Lawrence Livermore, que emplea un láser de neodimio de 20 terawatt, y el 8EB, del Laboratorio Nacional de los Alamos, con un láser de dióxido de carbono de 20 terawatt. En diferentes fases de construcción se encuentran: el NOVA que se emplazará junto al Shiva, y que con un láser de neodimio se intenta alcanzar los 300 terawatt; el Antares, que con la experiencia recogida con el 8EB incorporará un láser de CO_2 de 200 terawatt; y por último, el EBFA-II de los Laboratorios Sandia, que empleará un haz de electrones de 100 terawatt. Existen también diversos experimentos realizados y en construcción en la Unión Soviética, Francia y en el Japón, de características algo similares a los norteamericanos antes citados. No ha de olvidarse que fue el premio Nobel Basov, del Instituto Lebedev (Unión Soviética), quien propuso, en 1963, el empleo de láseres de potencia para la fusión nuclear.

Se prevé que, con una inversión global de unos 24.000 millones de dólares, inversión análoga a la destinada para el Proyecto Apolo, o que se supone para los misiles MX, se podrá construir el primer reactor de fusión nuclear demostrador de potencia para antes del año 2000. (Departamento de Energía Nuclear, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid.)

Micoplasmas y aceite: ¿doble causa de un mal mortal?

Entre las múltiples causas invocadas para explicar la intoxicación por aceite de colza desnaturalizado que tantas víctimas se ha cobrado en España, la que pareció revestirse de mayores pretensiones científicas fue aquella que atribuía el síndrome a una reacción citotóxica con las anilidas basada en una patología de radicales libres. Contra esa opinión acaban de escribir en *Nature* un breve y razonado informe Robert S. Root-Bernstein y Fred C. Westall, del Instituo Salk de Investigaciones Biológicas.

Afirman, en primer lugar, que los síntomas del síndrome no se corresponden con la toxicidad provocada por anilina o cualquier otro componente del aceite (ácido erúcico, quinolina, benceno, glucosinatos e hidrocarburos de cadena corta). Y en ningún laboratorio se ha hallado toxicidad clínica por anilinas en los niveles registrados en el aceite en cuestión.

Revisan luego la pretendida combinación de anilidas y radicales libres. Recuerdan que, con los datos en la mano, no podemos apelar a las anilidas como sustancia determinante del síndrome ni hablar de una patología de radicales libres. ¿Dónde está, pues, la causa del fatal síndrome?

Root-Bernstein y Westall recogen la idea, reiteradamente sostenida, de que pudiera tratarse de una combinación de factores, algunos de los cuales restan todavía por dilucidar. Por uno, en particular, se ha pasado muy a la ligera: el síndrome constituiría una forma de pneumonía atípica. De acuerdo con los datos publicados por el Ministerio de Sanidad y Consumo, en un tercio de los casos analizados se aisló el *Mycoplasma pneumoniae* u otras especies de *Mycoplasma*. Ahora bien, resulta muy difícil aislar ese virus, cuyo diagnóstico, además, requiere pruebas de anticuerpos. Añádase a ello que tan sólo una infección de *M. pneumoniae* de cada treinta certificadas se manifiesta como neumonía. Lo que significa que la tasa real de infección por *M. pneumoniae* será, a buen seguro, superior a la que informa el ministerio español.

Entienden Root-Bernstein y Westall que el síndrome tóxico sería una forma hiperaguda de infección por *M. pneumoniae*, que se vería ayudada por el consumo de aceite desnaturalizado. ¿En qué basan su hipótesis? En primer lugar, síntomas nerviosos y circulatorios que padecen los afectados aparecen también en ciertas complicaciones desacostumbradas de neumonía por *M. pneumoniae*. El papel subsidiario del aceite podría haber convertido en norma lo que suele ser la excepción. En segundo lugar, la eosinofilia y la alteración perivascular asociadas al síndrome tóxico se cuentan entre los síntomas característicos de las enfermedades autoinmunitarias alérgicas y crónicas. En tercer lugar, una etiología antigénica dual explicaría por qué no enfermaron todos los que habían consumido el aceite desnaturalizado. Este sería, en definitiva, causa necesaria aunque no suficiente para provocar el mal.

Por último, el aceite que sirvió para freir queda al margen del síndrome. Es-

te dato resta fuerza, por sí mismo, a la hipótesis de los radicales libres, porque sabido es que el calor crearía más radicales libres. Cabe, por contra, la posibilidad de que algunos constituyentes químicos del aceite se desnaturalizaran por acción del calor originando productos no tóxicos o coadyuvantes inactivos. Y entra dentro de lo posible que alguna partida del aceite quedara contaminada con *M. pneumoniae* que pudiera haberse infiltrado en una elaboración inadecuada. (Recuérdese que se registró un brote de neumonía poco antes de detectarse el síndrome.)

¿Un universo inflacionario?

Según postula la cosmología convencional que parte de la "gran explosión", el universo comenzó como un punto de densidad infinita y se expandió, en los primeros 10^{-35} segundos, hasta alcanzar el tamaño de una pelota de balonmano. En ese momento, el universo había adquirido una magnitud y se había expandido con una rapidez tales que ninguna señal que corriera con la velocidad de la luz podía haberlo cruzado. Las conexiones causales entre distintos fenómenos que tienen un límite en la velocidad de la luz quedaban confinadas a regiones no mayores de 10^{-25} centímetros de diámetro; en ese universo cabrían hasta 10^{78} regiones de semejante extensión.

La física nos permite resolver hoy varios problemas cosmológicos fundamentales en el supuesto de que el universo observable ahora ocupara una fracción extraordinariamente minúscula de una de esas regiones con conexión causal. A lo largo de un período, que comenzó 10^{-35} segundos después de la gran explosión y duró 10^{-32} segundos, la región pudo haber atravesado lo que se ha dado en denominar fase inflacionaria. La región creció en unos 100 órdenes de magnitud, desde una billonésima del diámetro de un protón hasta un diámetro equivalente a 10^{47} veces el del universo hoy observable. (Carece de importancia el valor exacto del factor de inflación, pues es mayor que 10^{25}.) A finales de la titánica expansión, la región que corresponde al universo hoy observable debió tener el tamaño de una pelota de balonmano, incluida en un universo inimaginablemente mayor, que desde entonces ha continuado expandiéndose más allá de nuestro horizonte de causas y efectos. A la edad de 10^{-35} más 10^{-32} segundos, la fase inflacionaria dejó paso a una fase convencional, y la región de pelota de balonmano, igual que el universo en derredor, retomaron la velocidad de expansión que desde entonces ha dirigido la evolución cósmica.

Tan sorprendentes afirmaciones proceden de un grupo de físicos y cosmólogos que ven en la teoría de partículas elementales el camino que lleva a una comprensión coherente, y hasta predecible, de lo que fue el universo 10^{-35} segundos después de nacer. La idea tuvo su origen en un artículo que apareció el año pasado en *Physical Review*, firmado por Alan H. Guth, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Guth denunciaba cabos sueltos en su escrito; pero, un año después, Andreas Albrecht y Paul Steinhardt, de la Universidad de Pennsylvania, e, independientemente, A. D. Linde, del Instituto Físico Lebedev de Moscú, han logrado despejar algunos interrogantes. Ellos tres, y varios más, se encuentran empeñados en la investigación del modelo inflacionario y sus consecuencias.

Guth aplicó los principios de la termodinámica a las interacciones entre materia y energía en un universo sometido a una temperatura de unos 10^{27} grados Kelvin. A tal temperatura se supone que una partícula tiene energía suficiente para que desaparezcan las diferencias entre tres fuerzas fundamentales. A temperaturas normales existen cuatro fuerzas: la fuerza fuerte, responsable de las interacciones nucleares; la débil, que explica la desintegración del neutrón en protón; la fuerza electromagnética y la de la gravitación. Una de las aspiraciones más ansiadas por los físicos teóricos es conseguir una teoría unificada de las cuatro fuerzas, aunque hasta ahora sólo haya logrado unirse las tres primeras. Por encima de la temperatura crítica de 10^{27} grados Kelvin, se predice que las fuerzas fuerte, débil y electromagnética son simétricas, esto es, indistinguibles unas de otras. Por debajo de la temperatura crítica, la interacción fuerte actuaría de diferente manera que las otras dos, rompiéndose la simetría. Consecuencia de ello sería que la energía y la materia entrarían en una nueva fase.

La transición de fase propuesta por Guth guarda estrecha relación con el paso de un líquido a sólido. La transición de líquido a sólido va acompañada de una redistribución de las moléculas del líquido en una red cristalina regular. La reordenación rebaja la energía total del sistema, por lo que, durante la transición de fase, debe extraerse cierta cantidad de energía, denominada calor latente. Pero puede enfriarse un líqui-

do por debajo de su punto de congelación normal si no hay puntos que sirvan de núcleos para la formación de cristales. Resulta de ello una nueva fase, denominada líquido superenfriado; al contacto con núcleos adecuados, el líquido se congelará, pero la liberación del calor latente elevará la temperatura del sólido resultante.

De forma similar, postula Guth, la fase simétrica de materia y energía predicha por las grandes teorías unificadas puede haberse superenfriado durante los primeros estadios de la evolución del universo. La fase simétrica quizá se mantuviera en algunas regiones del universo primitivo a temperaturas de sólo 10^{22} grados Kelvin. En la fase simétrica superenfriada, la materia y la energía se expandieron exponencialmente hasta que las regiones de fase simétrica se convirtieron en fase asimétrica, uno de cuyos testimonios percibimos ahora por todo el universo observable. Durante la transición de fase, la región expandida de fase simétrica liberó una enorme cantidad de calor latente, que recalentó la región hasta casi 10^{27} grados.

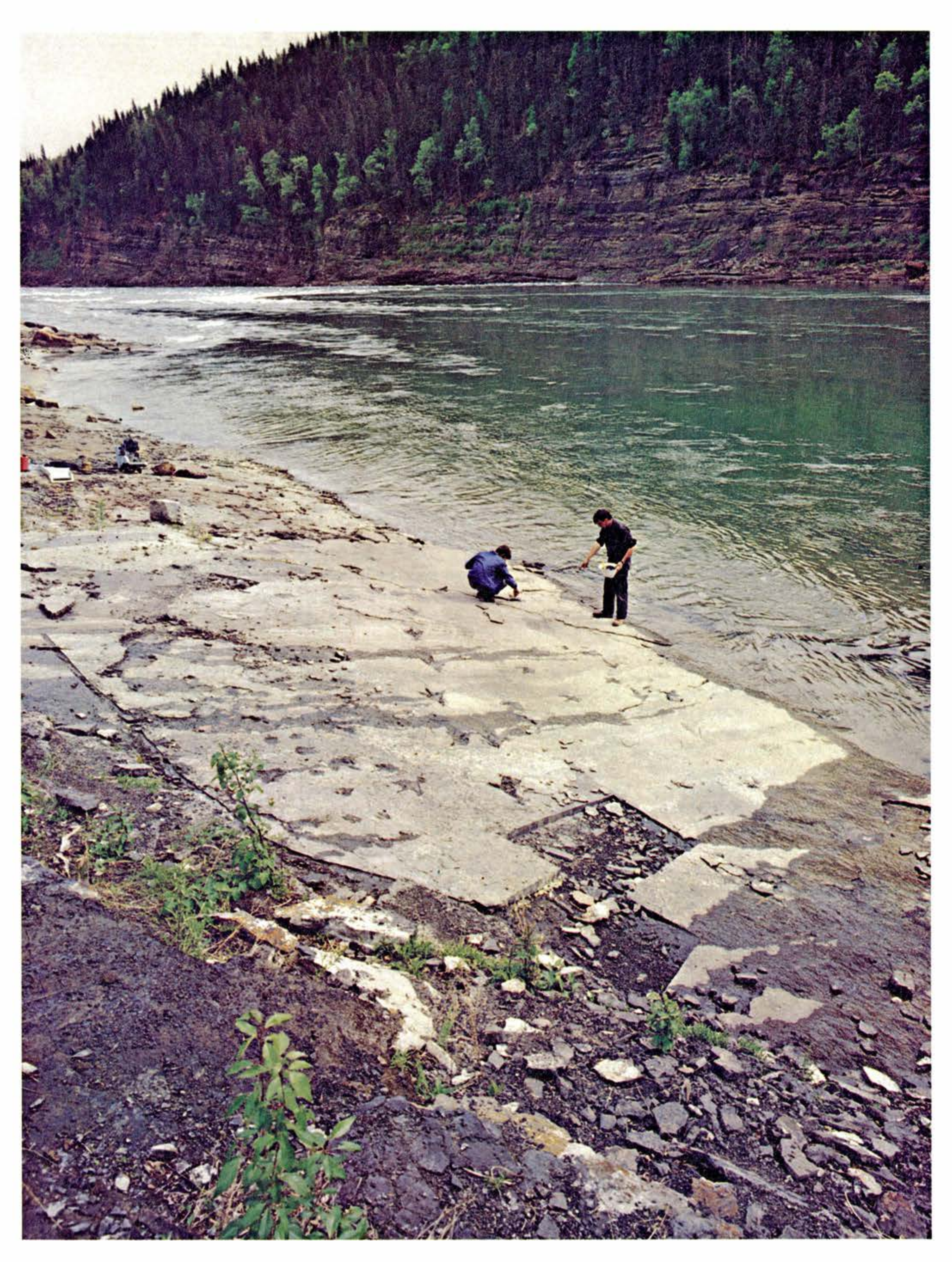
Aunque el modo inflacionario presenta todavía algunos problemas teóricos, resuelve al menos tres enigmas cosmológicos. Tiene que ver el primero con la homogeneidad de la radiación cósmica de fondo de microondas, que varía con la dirección en menos de una parte en 10.000. Si el modelo convencional de la gran explosión es correcto, las regiones del cielo separadas por más de dos grados de arco no habrían estado en contacto a lo largo de toda la historia del universo. Ninguna influencia causal habría tenido tiempo de mediar entre ellas. Puesto que la uniformidad de la radiación no puede explicarse por interacción causal entre regiones distantes, debe introducirse como hipótesis ad hoc en el modelo convencional. En el modelo inflacionario, semejante homogeneidad recibe una explicación lisa: el universo que precedió al que contemplan nuestros ojos era mucho más pequeño que el que supone el modelo convencional. Cualquier fracción del universo observable estuvo conectada en un momento dado con todas las demás partes.

El segundo enigma es el denominado problema de la planitud. Una de las cuestiones fundamentales en cosmología es si el universo es abierto o cerrado, esto es, saber si continuará expandiéndose indefinidamente o si la densidad de la materia es lo bastante grande para que las fuerzas gravitatorias detengan la expansión y retraigan el universo de nuevo a un punto. Si la densidad equivale exactamente a la densidad crítica que permite que el universo se expanda indefinidamente, se dice que el universo es plano: la geometría del espacio-tiempo no es curva, sino que se aproxima a la geometría euclídea del plano.

La densidad real del universo no se ha precisado aún con exactitud, pero se sabe que está comprendida entre uno y dos órdenes de magnitud de la densidad crítica. Para explicar la evolución del universo primitivo, sin embargo, no importa tanto que el universo sea abierto o cerrado, cuanto la razón de que la densidad observada se aproxime de ese modo al valor crítico. En el modelo convencional de la gran explosión, para que la densidad del universo sea coherente con los valores actuales, la densidad del universo primitivo debió ser igual a la densidad crítica con una precisión de una parte en 10^{49}. No requiere tamaña precisión el modelo inflacionario. Durante la expansión exponencial del universo, la región ocupada por el universo observable se hace cada vez más plana, y la densidad de masa converge naturalmente hacia la densidad crítica. El universo observable es plano por la misma razón por la que una pequeña mancha en un globo se aproxima a la geometría del plano.

La tercera cuestión es de índole técnica: ¿cómo puede reconciliarse con la gran explosión la producción de las partículas exóticas denominadas monopolos magnéticos, que predicen las grandes teorías unificadoras? Los monopolos se generan durante la transición de la fase simétrica a la asimétrica, y el número de monopolos generado es proporcional a la velocidad de la transición. En el modelo convencional de la gran explosión, la transición es tan rápida que se crean monopolos en abundancia; su número bastaría para suponer la existencia de una densidad ilógicamente elevada de materia. En el modelo inflacionario, la transición de fase es más lenta y la producción de monopolos, menos abundante.

La mayor dificultad que se le plantea al modelo inflacionario es justificar la característica más notable del universo observable: la acumulación de materia para formar galaxias, estrellas y planetas. Las pequeñas fluctuaciones de la densidad del universo primitivo desaparecerían absolutamente o se aglutinarían demasiado aprisa para explicr la distribución observada de la materia. Sostienen muchos que la formación de galaxias fue un proceso posterior.



1. ACUMULO DE PISADAS FOSILES descubiertas durante los trabajos de recuperación que se realizaron antes de la inundación provocada por el cierre de la presa del cañón del río Peace. Contenían esta serie de rastros de dinosaurio conservados en sedimentos del Cretácico inferior. En primer término se observa el hueco dejado por la extracción de un bloque con huellas. En el centro, investigadores del Museo de Historia Natural de Alberta preparan moldes de otras huellas. A lo largo de 6,5 kilómetros, los trabajos han identificado 1700 huellas de dinosaurios de, por lo menos, 10 especies distintas.

Huellas de pisada de animales extintos

Los vertebrados han dejado su huella sobre los sedimentos desde que aparecieron sobre tierra firme hace 370 millones de años. La mayoría de las especies extinguidas que se conocen lo son por sus huellas

David J. Mossman y William A. S. Sarjeant

Los esqueletos de animales terrestres extintos que contemplamos en los museos inducen a pensar en los huesos como principal prueba fósil que queda de tales organismos. La verdad es muy otra. Hay muchísimos menos restos óseos que huellas. Y lo que es más: de muchas especies extintas sólo conocemos sus pasos, sin que exista quizá ningún otro testimonio de su cuerpo. En Inglaterra, por ejemplo, los sedimentos del Triásico medio de Worcestershire y los del Triásico superior de Nottinghamshire, ambos depositados durante el Mesozoico o "edad de los reptiles", no contienen fósiles de animales vertebrados. Sin embargo, las huellas encontradas en estas formaciones ponen de manifiesto que al menos ocho tipos diferentes de reptiles se desplazaron sobre los sedimentos de Worcestershire y otras seis clases hicieron lo mismo en Nottinghamshire.

Las huellas dan testimonio también de la primera invasión que se conoce de la tierra emergida por parte de los vertebrados. Se han hallado esas marcas en la formación Arenisca Roja Antigua, de las Islas Orcadas, que data del Devónico medio (370-360 millones de años atrás). Registran el paso de un pez primitivo que, como los actuales peces pulmonados, vivió a merced de los períodos estacionales de sequía. Este pez primitivo dejó su impronta cuando arrastraba su cuerpo por el suelo desde un charco de agua a otro, impulsado por sus aletas lobuladas, cortas y robustas.

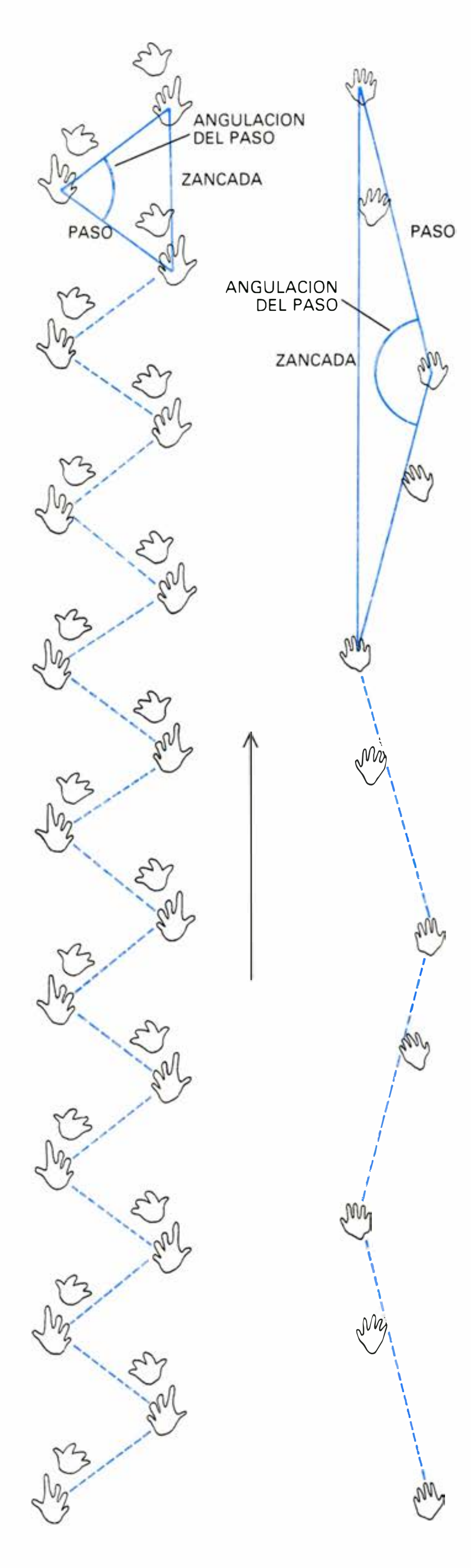
El Devónico puede parecernos hoy un período remoto. Pero si lo consideramos dentro de la escala temporal absoluta de la historia de la Tierra, no transcurrió hace tanto. Hagamos la siguiente transformación: valga un año los 4500 millones que han pasado desde que se formó la Tierra; un día duraría, en ese supuesto, 12,3 millones de años. Sobre tal escala de tiempo, las primeras formas de vida (plantas primitivas similares a las actuales algas unicelulares) aparecerían en los mares a principios del mes de mayo, mientras que las primeras formas pluricelulares no lo harían hasta comienzos de noviembre. Alrededor del 20 de noviembre, los peces primitivos empezarían a nadar en las aguas del planeta y hacia finales del mes sus descendientes se aventurarían por tierra firme. El 7 de diciembre, los reptiles se habrían convertido en los animales terrestres dominantes y, a mediados del mismo mes, asomarían los primeros mamíferos. Hacia las cinco de la tarde del último día del año dos homínidos primitivos dejaron sus huellas sobre unas cenizas volcánicas recién depositadas sobre la planicie de Laetoli, Kenya. Nuestro propio género, *Homo,* nacería una hora antes de la medianoche (hace unos 500.000 años). Así pues, el intervalo completo de la vida de los vertebrados terrestres abarca menos de seis semanas del "año" de historia de la Tierra. Y aun cuando ese importante intervalo comprenda unos 360 millones de años, constituye una parte muy pequeña de la historia del planeta.

El registro terrestre

A lo largo de este intervalo se conservaron dos tipos de testimonios fósiles que sirven de ayuda a los paleontólogos para interpretar la vida animal del pasado. Los restos animales constituyen una primera clase: huesos fosilizados, articulados o separados, con o sin estructuras asociadas, como dientes, escamas o plumas y, en pocos casos, con impresiones fosilizadas de la piel u otros tejidos. A partir de estos restos se puede reconstruir el aspecto del animal con bastante precisión y deducir cómo se movía y alimentaba. No obstante, un animal posee sólo un cuerpo y, sus restos, si es que logran conservarse, pueden hallarse en un lugar exclusivamente. La otra clase de prueba fósil son las huellas y pistas del animal; constituyen un testimonio mucho más dinámico y extendido. Con el estudio de estos indicios del comportamiento animal, el paleontólogo está preparado para imaginárselo en acción.

Los primeros peces de aletas lobuladas en adentrarse en tierra emergida, en los tiempos devónicos, dieron lugar a los anfibios de cuatro patas. En términos de evolución, la transición fue rápida: en formaciones del Devónico superior se han encontrado ya las primeras huellas de anfibios. Los rastros de los anfibios son característicamente anchos, y muestran una zancada corta que es típica de una locomoción cuadrúpeda más bien torpe. Las marcas presentan una impresión completa de las palmas (lo que denota una marcha lenta) y dedos sin uñas, ampliamente extendidos y dirigidos hacia fuera más que hacia delante. Abundan huellas de anfibios en los sedimentos del Carbonífero, período que sigue al Devónico; hay menos muestras del Pérmico (hace de 280 a 225 millones de años) y son escasas en el registro fósil posterior, debido sobre todo a que los anfibios supervivientes preferían, como sus representantes actuales, las condiciones húmedas, y éstas no son adecuadas para la conservación de las huellas.

El comienzo de la dominación de los reptiles se observa con claridad a lo largo del Carbonífero superior y Pérmico, a medida que el número de sus huellas aumenta paulatinamente. Tanto la diversificación de estos animales como la progresiva eficacia de su locomoción se plasman en los cambios de la forma de



2. MEDICIONES efectuadas sobre los rastros. A la izquierda aparece un rastro ancho, característico de un anfibio; muestra las huellas sucesivas delanteras y traseras de una especie que se extinguió al final del Paleozoico. Tal como indica el triángulo casi equilátero coloreado, el paso y la zancada del animal eran cortos. A la derecha, se ilustra el rastro, más estrecho, característico de un reptil; revela las huellas sucesivas de un dinosaurio. La longitud del paso y la de la zancada son, en proporción, mucho más largas que las del anfibio; significa ello que se trataba de una locomoción más eficaz.

los dedos, incluyendo el desarrollo de un quinto dedo, un pulgar corto, y la aparición de uñas. En algunos linajes de reptiles los rastros se estrechan y las zancadas se alargan. Los animales se movían con más rapidez, pero mantenían su marcha cuadrúpeda. Otras huellas revelan que en el Pérmico superior algunos reptiles pequeños desarrollaban una marcha cuadrúpeda cuando se movían despacio y la adoptaban bípeda cuando lo hacían deprisa. Su cuerpo pivotaba sobre las caderas; una larga cola equilibraba las patas traseras y el tronco, casi erguido.

De este grupo de reptiles surgieron los dinosaurios al comienzo del Mesozoico (hace 225 millones de años). Muchos dinosaurios triásicos fueron predominante o totalmente bípedos. Incluso en grupos que más tarde recobraron la locomoción cuadrúpeda existió una marcada desproporción en el tamaño de las extremidades. El cuerpo seguía pivotando sobre la pelvis y generalmente las patas traseras eran mucho mayores que las delanteras. De todas las huellas fósiles, los rastros de dinosaurios son las más espectaculares; se encuentran en abundancia en sedimentos continentales del Mesozoico de la mayor parte del mundo.

Con el tiempo, dos grupos de pequeños dinosaurios desarrollaron alas. En un grupo, los pterosaurios, las membranas que capacitaban al animal para planear se extendían hacia fuera desde los costados del cuerpo, soportadas por un cuarto dedo, muy alargado, de las extremidades delanteras. W. L. Stokes, de la Universidad de Utah, ha encontrado pistas fósiles de estos reptiles voladores en sedimentos de la formación Morrison, en el Jurásico superior de Arizona. Sus huellas muestran que estos animales, además de planear, caminaban a cuatro patas, arrastrando el ala membranosa sobre el suelo por detrás de las extremidades delanteras.

En el segundo grupo, una modificación de las escamas epidérmicas condujo al desarrollo de plumas y a la obtención de un sistema de vuelo más eficaz. La evolución de las aves a partir de los dinosaurios no produjo modificaciones inmediatas en las patas traseras, pero las huellas de estilo netamente aviar no tardaron mucho en aparecer. La transición se hace evidente en las huellas de aves, excelentemente conservadas, que fueron halladas por Philip J. Currie, del Museo Tyrrell de Paleontología de Drumheller, Alberta, en sedimentos del Cretácico medio del este de la Columbia Británica (Canadá).

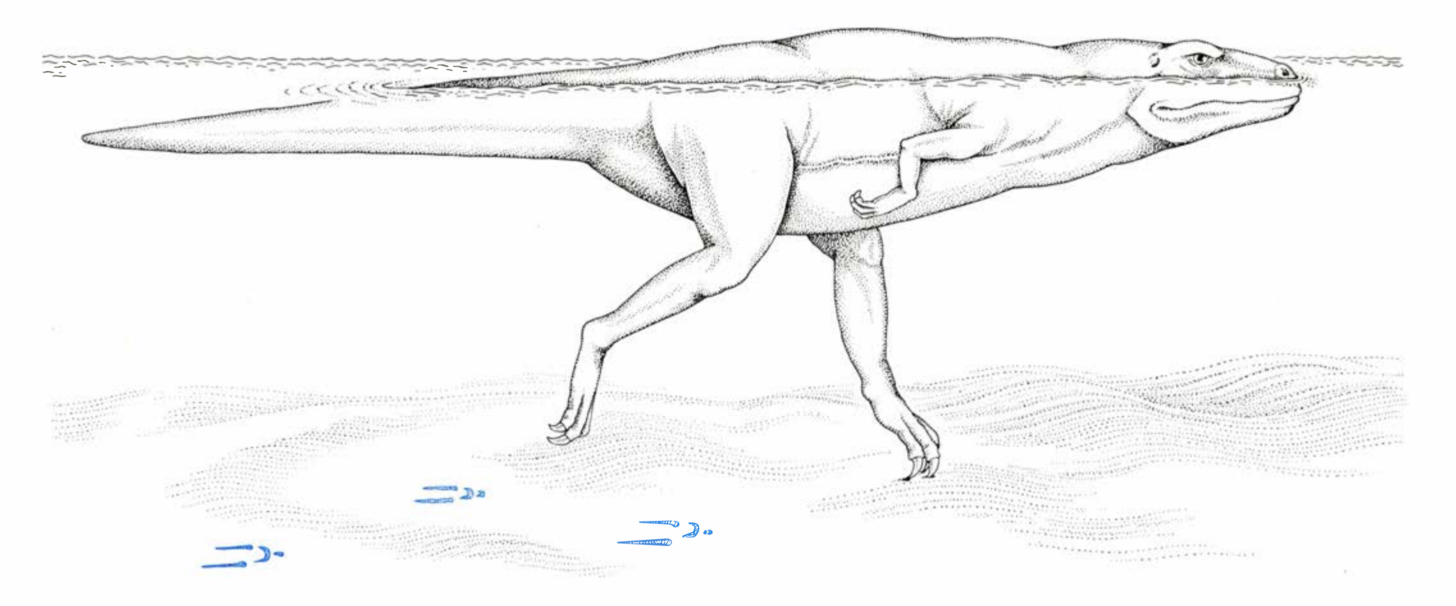
No todos los reptiles mesozoicos alcanzaron la marcha bípeda. Los sinápsidos fueron un grupo persistentemente cuadrúpedo, un tipo de reptiles que se mantuvo separado de los dinosaurios a lo largo de toda su historia. Sin embargo, también en ellos la zancada se alargó, el rastro se hizo más estrecho y los dedos se dirigieron hacia delante, cambios todos ellos que evidencian una locomoción cada vez más eficaz y rápida. La estructura del pie de los sinápsidos fue acercándose progresivamente a la estructura del pie de un mamífero. En efecto, en los sedimentos del Triásico superior y Jurásico inferior de la provincia de São Paulo, el paleontólogo Giuseppe Leonardi ha encontrado numerosas huellas cuya forma se encuentra a medio camino entre reptiles y mamíferos, y podrían atribuirse tanto a uno como a otro grupo.

Con el final del Mesozoico, las huellas de dinosaurios desaparecen de la historia geológica. Desde el comienzo de la era Cenozoica, hace 65 millones de años, la variedad de huellas de mamíferos se corresponde con la creciente diversificación de estos evolucionados vertebrados. Esa diversificación es uno de los principales acontecimientos evolutivos del período Terciario, la primera y más larga parte del Cenozoico. No ha de resultar sorprendente, por tanto, que en el período siguiente, el Cuaternario, con el que la historia geológica llega hasta el presente, encontremos entre las huellas de mamíferos de Laetoli testimonios de que alguno de los precursores erguidos del hombre dejó su rastro en el registro fósil.

La pista del descubrimiento

¿Cuál fue el primer descubrimiento documentado de huellas de vertebrados fósiles? Si alguien pensara que tuvo lugar en Europa, y que lo realizó cualquier afamado pionero de la geología se equivocaría. Ocurrió, en 1802, en el valle del río Connecticut, cerca de South Hadley, Massachusetts, donde existen unas capas de areniscas rojas que se extienden desde el Triásico superior hasta el Jurásico inferior. El mérito del hallazgo correspondió a Pliny Moody, un muchacho de un caserío cercano; eran huellas de pequeños dinosaurios. Pero los dinosaurios no se conocían todavía y se creyó que las pisadas pertenecían a grandes aves. No faltó quien asignara las improntas al cuervo de Noé.

El primer informe erudito sobre un hallazgo de huellas fósiles vio la luz

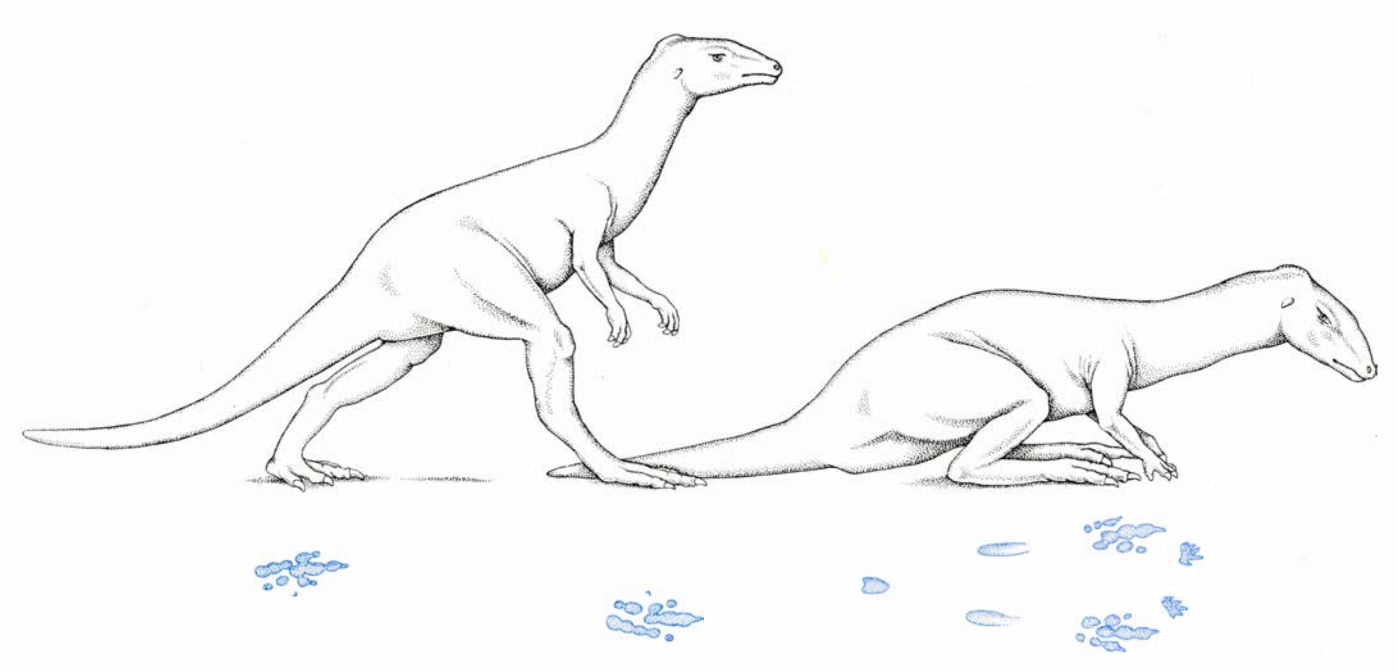


3. HUELLAS DE NATACION de un dinosaurio carnívoro encontradas en sedimentos del Jurásico. Son marcas de las uñas y de la punta de los dedos, que no prueban se ejerciera presión sobre el fondo. La representación del carnívoro nadador se basa en una restauración de *Megalosaurus* realizada por Matthew Hyman. Las huellas revelan que los dinosaurios herbívoros, presas de los carnívoros, quizás no se salvaran adentrándose en el agua.

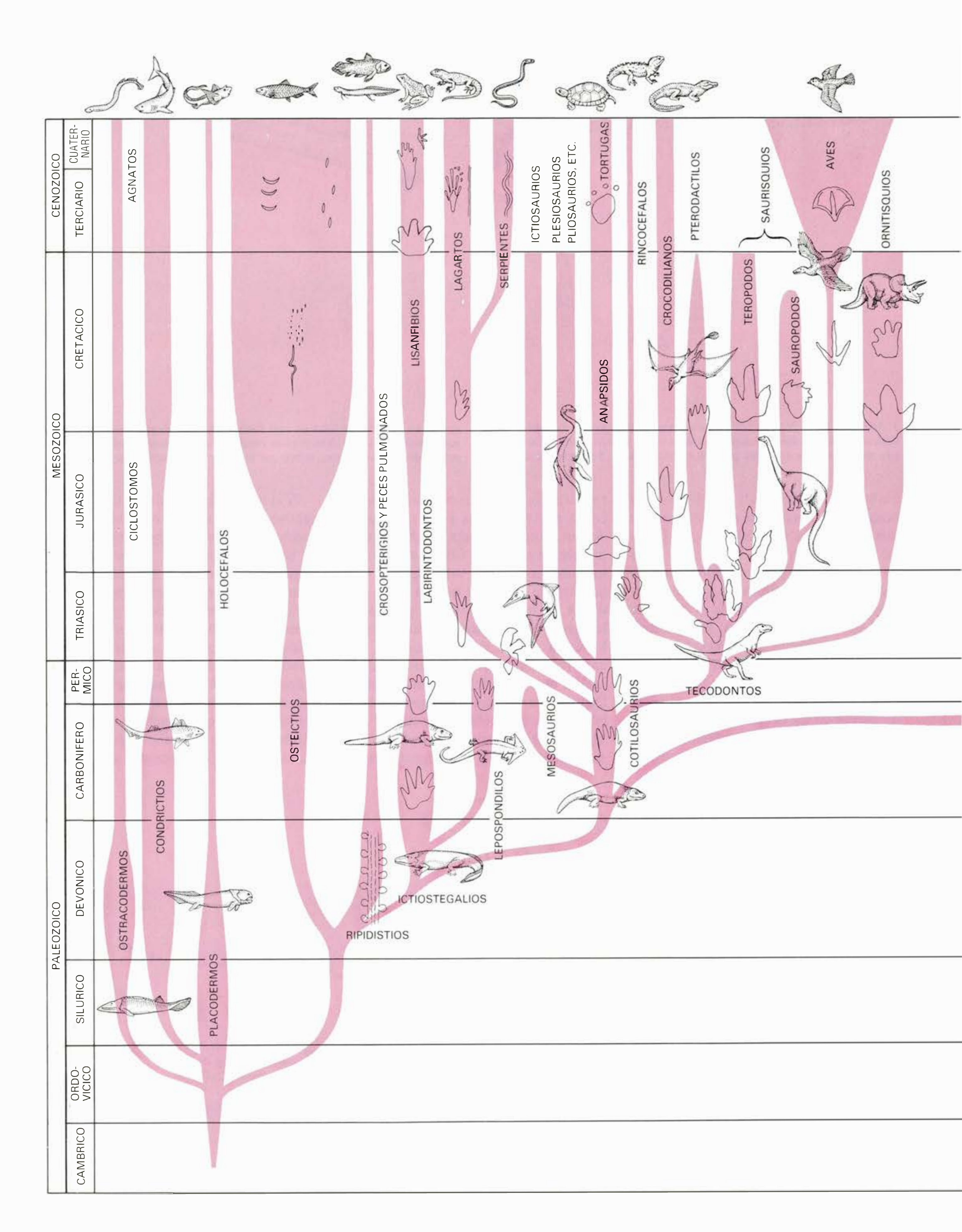
un cuarto de siglo más tarde. En esta ocasión las huellas se encontraban en una formación sedimentaria de Escocia, la Arenisca Roja Nueva. La edad de la formación era por aquel entonces incierta, pero sabemos ya que esos sedimentos se depositaron en el intervalo final de la Era Paleozoica. El descubridor fue un clérigo y naturalista aficionado del lugar, el Reverendo Henry Duncan. Su descripción de las huellas, publicada en 1828, dejó atónito al mundo científico de la época.

Estas marcas, que muestran el movimiento de un animal de zancada corta y rastro ancho, se reconocen actualmente como pertenecientes a un caseasaurio de un grupo de reptiles herbívoros, grandes y pesados. Como ocurrió con los dinosaurios del valle del río Connecticut, no se tenía noticia de la existencia de los caseasaurios, por lo que las huellas se atribuyeron, con bastante lógica, a alguna clase de tortuga. William Buckland, un distinguido geólogo inglés, enterado del descubrimiento de Duncan, se aprestó a comprobar la hipótesis de la huella de tortuga. John Murray III, conocido editor de la época, relataba así las investigaciones:

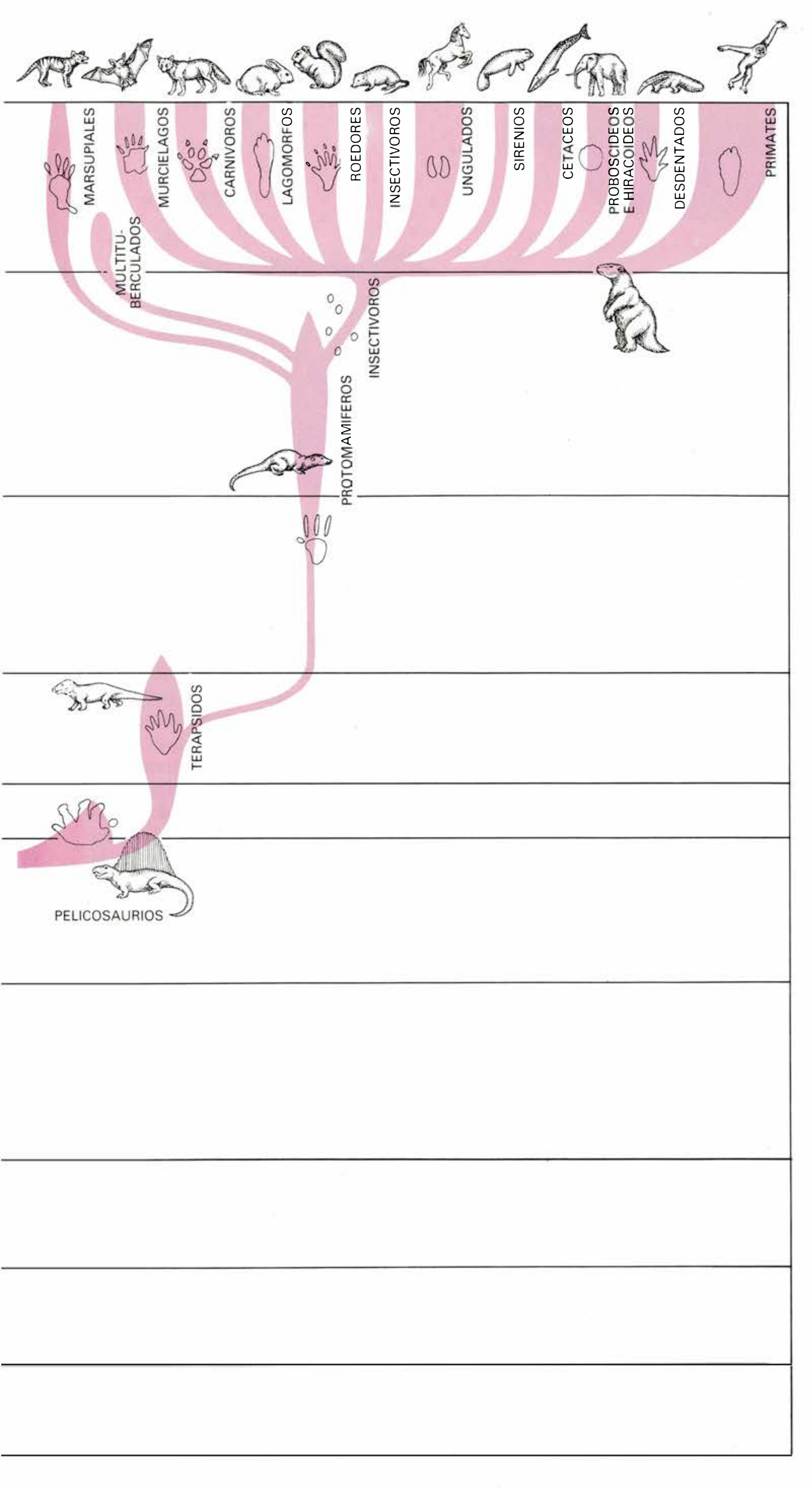
"Fui el pasado sábado a una reunión celebrada en casa de Mr. Murchison, convocada para contemplar tortugas en la acción de caminar sobre masa de hojaldre. El profesor Buckland actuó como maestro de ceremonias. Estaban allí presentes otros muchos geólogos y sabios, entre ellos el Dr. Wollaston. Al principio las bestias se empeñaron obstinadamente en permanecer quietas. Rápidamente el profesor recurrió a su ingenio con el objeto de hacer que se moviesen, lo que trató de conseguir efectuando con la mano varios tirones de las colas de las tortugas; sin embar-



4. HUELLAS DE DINOSAURIO halladas en areniscas rojas del Jurásico inferior en el valle del río Connecticut. Nos hablan de un animal bípedo, como se observa en las de la izquierda, que algunas veces caminaba también a cuatro patas, según se ve en las de la derecha. Se trata de uno de tantos reptiles extintos de los que tan sólo nos han quedado sus huellas. A partir de los cuales, Richard Lull, de Yale, hizo la reconstrucción que aquí se recoge.



5. LA EVOLUCION DE LOS VERTEBRADOS ha dejado constancia en las numerosas huellas del registro fósil. Entre éstas, el rastro terrestre más antiguo: el que dejó un pez crosopterigio en la Arenisca Roja antigua de las Islas Orcadas en los tiempos del Devónico medio (quinta banda desde la izquierda).



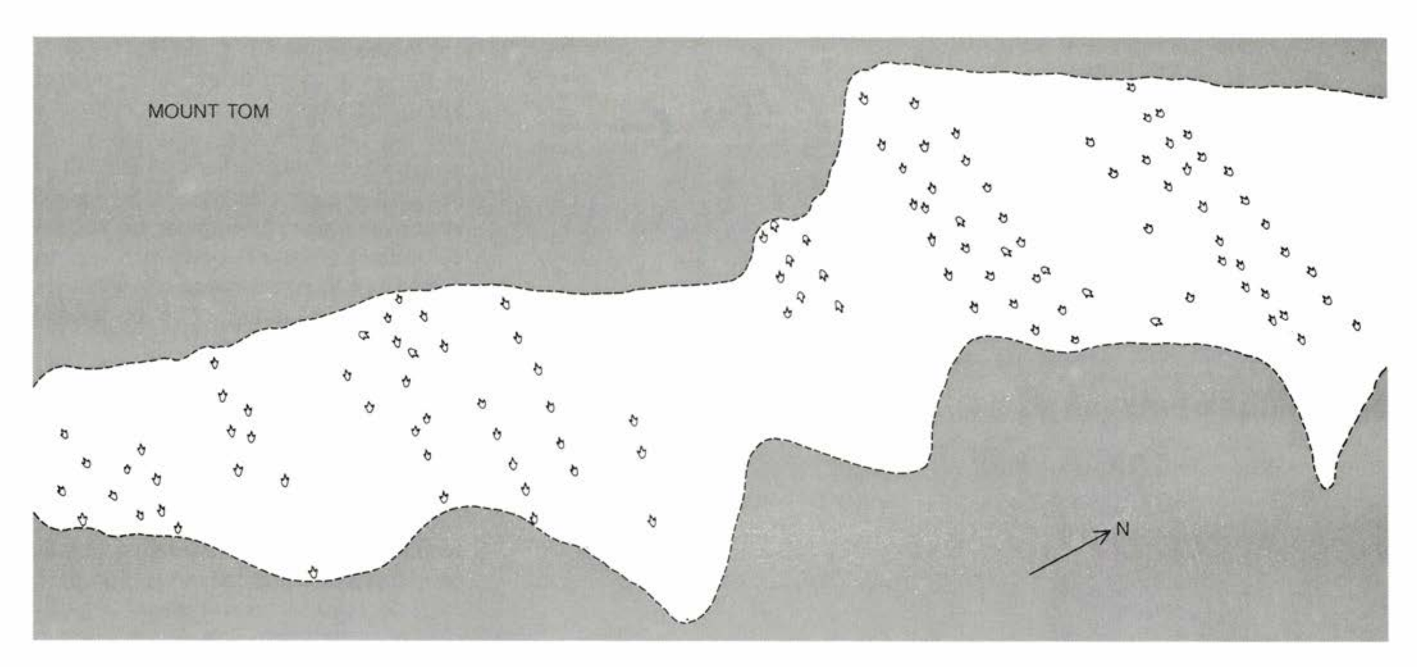
Una sucesión de anfibios, reptiles, aves y mamíferos dejaron de igual forma impreso su paso. La última marca, en el extremo derecho, corresponde a la impresión dejada por un homínido en Kenya.

go, parecía que ni el diablo lograría moverlas, y no era de extrañar, pues al intentar levantarlas se descubrió que estaban tan adheridas a la pasta que arrastraban con ellas media libra de masa pegada a cada pata. Se aceptó la conveniencia de emplear un rodillo de cocina y amasar la pasta otra vez; no dudó el geólogo en ensuciar sus manos en labores culinarias. Fue realmente una escena gloriosa contemplar todos aquellos filósofos, embadurnados de harina y arremangados. Sus esfuerzos, me complace decirlo, se vieron por fin coronados por el éxito; se obtuvo la consistencia adecuada de la masa y los animales realizaron satisfactoriamente su trayectoria; hasta tal punto que muchos escépticos que habían venido para mofarse regresaron con mejor disposición para aceptarlo."

Después del descubrimiento de Duncan se dieron a conocer otras muchas huellas, que no siempre fueron aceptadas. En las costas de Horton Bluff, Nueva Escocia, William Logan, un visitante escocés, encontró en 1841 un bloque de roca sedimentaria que presentaba unas huellas de vertebrados muy bien conservadas. La formación pertenecía al Carbonífero, período, según la opinión predominante en la época de Logan, demasiado antiguo dentro de la historia de la Tierra para que hubiesen existido otros vertebrados aparte de los peces. Cuando, de regreso en Gran Bretaña, Logan mostró su hallazgo ante los miembros de la Sociedad Geológica, la prueba se rechazó.

Hasta 1872 no llegaría la reivindicación de Logan. En aquel año John W. Dawson, trabajando con uno de los padres de la geología, Sir Charles Lyell, estaba realizando investigaciones en estratos carboníferos de la costa este de la bahía de Fundy. Estos estratos incluyen las cuencas carboníferas de Joggins, Nueva Escocia, donde han quedado fosilizados varios tocones verticales de árboles. Dawson había predicho que en los huecos interiores de esos tocones podían aparecer restos fósiles de pequeños anfibios y reptiles. Su predicción era correcta; había restos de reptiles en el interior de los tocones; quizá quedaron atrapados en los huecos de los troncos mientras buscaban agua o insectos. De cualquier forma, resultaba evidente que la fauna carbonífera incluía también vertebrados terrestres.

Logan y Dawson estaban destinados a ocupar un puesto de relieve en la ciencia canadiense. Logan se convirtió en el primer director del Servicio Geológico y Dawson llegó a ser rector de la Universidad McGill. Con el tiempo



6. COMPORTAMIENTO SOCIAL entre los dinosaurios. De su gregarismo nos hablan estos rastros fósiles de edad triásica hallados en el valle del río Connecticut, cerca de Holyoke, Massachusetts. El análisis de las huellas realizado por John H. Ostrom, de Yale, revela que al menos 19 carnívoros del género *Eubrontes* cruzaron unas arenas húmedas, desplazándose de este a oeste. La dirección común permite suponer que cazaban en manadas.

ambos recibieron el título de caballeros.

Interés en declive

En la segunda mitad del siglo XIX se publicaron muchas descripciones de huellas de vertebrados fósiles; bibliografía que decrece notablemente en la primera mitad de la centuria siguiente. Esta rama de la paleontología conocida formalmente como icnología (del griego *ikhnos,* huella) pierde progresivamente el favor de los geólogos. Las razones no son difíciles de comprender. Entre 1930 y 1960 los escasos artículos dedicados al particular salieron, principalmente de la pluma de aficionados, publicados en revistas relativamente oscuras y de menguada calidad. Los relatos firmados por los descubridores de tales rastros adolecían de interpretaciones insuficientes y apenas si relacionaban sistemáticamente sus hallazgos con las huellas registradas con anterioridad. Las fotografías de las impresiones, si es que se incluían, se habían tomado generalmente con iluminación superior, no con la luz lateral que se precisa para destacar impresiones poco profundas o moldes en bajorrelieve. A menudo, las ilustraciones no sólo eran peores que las fotografías, sino que se trataba de unas líneas trazadas inadecuadamente. Los autores casi nunca hacían constar dónde podía ser examinado el ejemplar por otras personas, principalmente porque la mayoría de ellos jamás se incorporaron en colecciones o gabinetes de estudio. Aunque en descargo de los autores hay que señalar que los bloques con huellas de pisada, grandes y difíciles de manejar, suelen ser impopulares entre los conservadores de museos. Estos bloques, una vez recibidos en los museos, acaban yendo a parar al exterior del recinto cubierto, colocados sobre el suelo a modo de losas, donde terminarán desgastados por el paso de los visitantes, o bien apoyados a una pared y expuestos a las inclemencias de los elementos; el tiempo se encargará de destruirlos.

Mediado el siglo XX, las investigaciones del paleontólogo alemán Walter H. Häntzschel y el esfuerzo de su discípulo Adolf Seilacher despertaron nuevamente el interés por las huellas fósiles dejadas por organismos marinos. No se produjo, en cambio, un renacimiento paralelo del interés por las huellas de vertebrados. Hoy, sólo un puñado de investigadores se ocupa de ellas; citaremos algunos: Leonardi y Rodolfo Casamiquela en América del Sur, Donald Baird, de la Universidad de Princeton, Justin Delair en Gran Bretaña, Georges Demathieu y Albert F. de Lapparent en Francia, Hartmut Haubold en Alemania Oriental y O.S. Vialov en la Unión Soviética.

A los problemas que plantea la falta de una literatura adecuada sobre el tema hay que añadir otras dificultades con las que se encuentra el estudioso de las huellas fósiles. La primera de todas la constituyen las características iniciales de las huellas mismas. Las condiciones idóneas para que se formen unas huellas nítidas exigen la existencia de una capa húmeda de sedimentos cohesivos de grano fino que sea pisada por el animal. Esto debería de haberse hecho lentamente, dejando unas impresiones detalladas de las extremidades delanteras y traseras (en el supuesto de que el animal sea cuadrúpedo). Bajo tales circunstancias ideales, se conservaría hasta el contorno preciso de las uñas, la forma de las plantas y el tipo de escamas.

Se han hallado pocas impresiones de tan alta calidad. Si el sedimento es demasiado grosero, no retendrá los detalles; si húmedo en exceso, los huecos más profundos se rellenarán de agua, distorsionando la forma de la huella; si demasiado seco, no será suficientemente cohesivo para conservar la impresión. Un viento fuerte puede borrar la marca, y si ésta quedó cerca de la orilla, la marea alta puede anularla. El propio depósito de sedimentos sobre la huella formada, condición esencial para su preservación, puede significar también su destrucción. Cuando el nuevo sedimento guarda un estrecho parecido con aquel donde se formó la impresión, los dos estratos tenderán a quedar soldados cerrando toda posibilidad al descubrimiento de las huellas hendidas.

Las condiciones más favorables para la conservación se dan después de que han retrocedido las aguas de una crecida, dejando expuesta una capa de sedimentos recientes de grano fino. En el litoral, estas condiciones concurren una

vez alcanzado el nivel más alto de una marea de primavera. Tierra adentro ocurre luego que la estación de lluvias levanta a su punto más alto el nivel de las aguas de un río o de una charca. Las impresiones realizadas en esa superficie húmeda solidificarán en cuanto se seque el sedimento, y quedarán enterradas cuando se produzca la próxima sedimentación. Incluso entonces puede ocurrir que no quede conservada la impresión sino su molde, especialmente si el sedimento más reciente tiene un grosor y una cohesión mayores que el anterior. Tales moldes deberán observarse sobre el muro o superficie inferior de las capas sedimentarias, pudiendo pasar desapercibidos a menos que la capa aparezca volcada a causa de un derrumbamiento del talud o durante el curso de la explotación de una cantera.

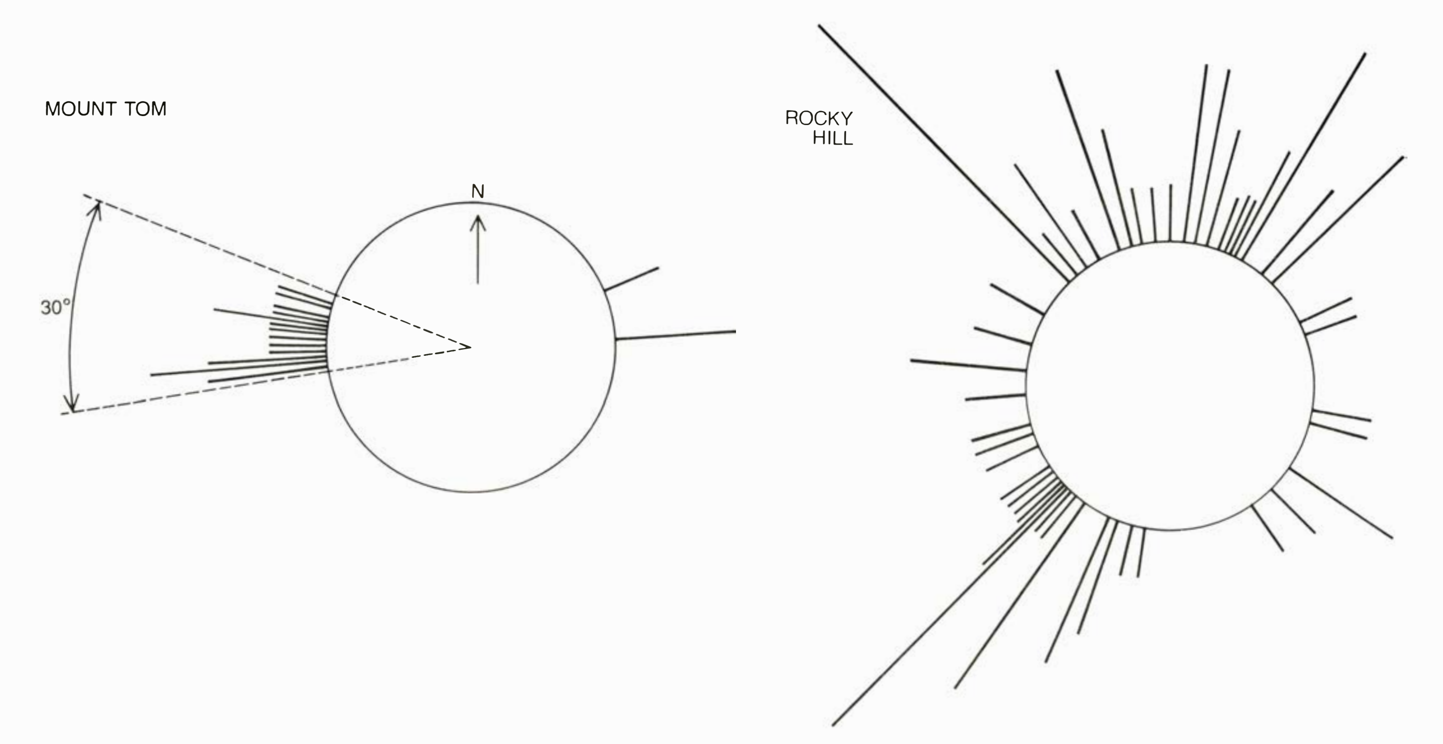
Por último, la probabilidad de que una huella de un animal terrestre se fije y reconozca más tarde es directamente proporcional al tamaño del animal. Los individuos grandes necesitan hacer largos recorridos en busca de alimento y acudir frecuentemente a los manantiales. Las impresiones de sus huellas son más profundas y, por tanto, se destruyen con menos facilidad. Aunque los animales pequeños proliferan más que los grandes, se desplazan menos, no necesitan tanta comida y agua y dejan huellas menos hondas. Esta es la razón por la que las huellas de un dinosaurio ofrecen una probabilidad de haber quedado preservadas mayor que las de una lagartija, y mucho mayor de ser reconocidas por el paleontólogo.

Análisis de huellas

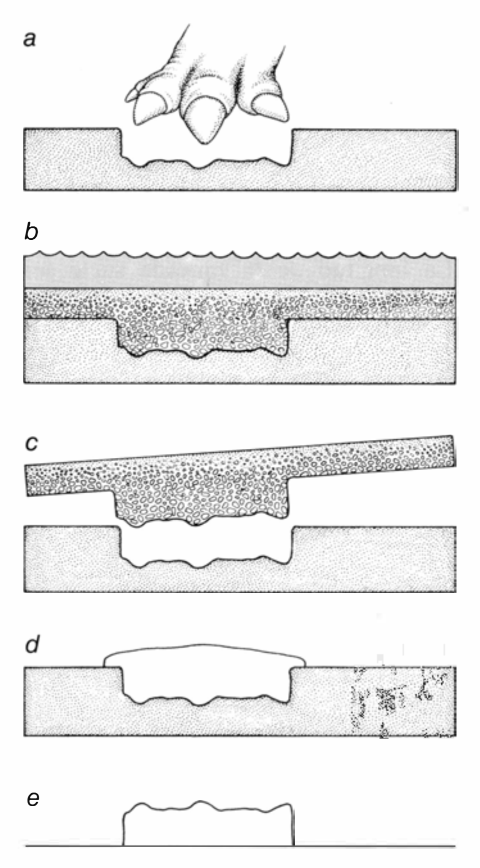
En teoría, el análisis ideal de un rastro debiera apoyarse en una secuencia de tres huellas o moldes, por lo menos. Entre los cuadrúpedos, la locomoción se inicia con la pata trasera de un lado seguida por la delantera del mismo lado; a continuación, se mueven la parte trasera y delantera del otro lado. En locomoción rápida dos o tres patas se apoyan en el suelo simultáneamente, mientras que en locomoción más lenta lo hacen a la vez tres patas o incluso las cuatro. Durante la locomoción a saltos, las cuatro huellas quedan estampadas juntas y próximas, pero no se superponen. Las huellas de saltos son extremadamente raras en el registro fósil; de éstas Leonardi y uno de nosotros (Sarjeant) acaban de recuperar algunas en una formación del Mesozoico de Brasil. Las huellas de bípedos normalmente muestran una alternancia del pie izquierdo y del derecho; rara vez estas huellas aparecen una al lado de la otra.

El analista de un rastro empieza por efectuar cuatro mediciones básicas. La primera corresponde a la magnitud de la zancada, o movimiento hacia adelante; se toma desde un punto fijo de una huella hasta el punto equivalente de la huella siguiente del mismo pie. La segunda es la medida del paso; por tal se entiende la distancia entre la pata delantera derecha y la izquierda, y entre la pata trasera derecha y la izquierda. La longitud de la zancada suele ser idéntica para las patas delanteras y traseras; la longitud del paso, sin embargo, puede diferir grandemente. La tercera es la medida de la angulación del paso ("step angle"); se trata del ángulo formado al unir el punto medio de tres huellas traseras o delanteras sucesivas. La cuarta es la medida de la anchura del rastro. Como habíamos dicho, la marca que deja un animal de locomoción poco eficaz se caracteriza por un rastro ancho y una zancada corta. Y a la inversa, un rastro estrecho y una zancada larga evidencian un animal de locomoción eficiente que se está moviendo rápido. No obstante, un rastro de características moderadas tanto en anchura como en zancada puede representar lo mismo a un animal de locomoción indecisa que a otro de marcha decidida moviéndose despacio.

Para huellas de cuadrúpedos otra medida importante a recabar concierne a la distancia que hay desde el punto medio entre dos impresiones consecutivas de las patas traseras hasta el punto



7. ESTOS DIAGRAMAS EN ROSETA ponen de relieve el contraste entre la orientación no debida al azar de las huellas de *Eubrontes*, a la izquierda, con la orientación mucho más aleatoria de más de 1000 huellas similares de dinosaurios procedentes de otra localidad del valle del río Connecticut, Rocky Hill, a la derecha. No se representan todas las huellas registradas en cada localidad. Sin embargo, a la izquierda, el 70 por ciento de todos los rastros se extienden dentro de un arco de 30 grados. La distribución al azar evidente en la parte derecha sugiere que los rastros de Rocky Hill fueron impresos durante un período de tiempo más dilatado, pero no excluye totalmente la posibilidad de una actividad gregaria. (Dibujos de Patricia J. Wynne.)



8. CONSERVACION DE UNA HUELLA. Requiere, efectuada la marca en el suelo (*a*), que el sedimento afectado se haya cubierto con otro sedimento de distinta textura (*b*) y que ambos endurezcan. Los dos sedimentos pueden separarse más tarde. Si sólo se conserva el sedimento del relleno (*c*), tendremos un molde natural. Pero si sólo lo hace el sedimento deprimido (*d*), tendremos una marca natural que servirá para construir moldes (*e*).

medio entre dos impresiones similares de las patas delanteras. Este valor representa la distancia real entre la articulación de la cadera y la de los hombros del animal vivo. Corresponde aproximadamente a la longitud del tronco del animal (cabeza, cuello y cola aparte).

Los bordes de las huellas o de los moldes de éstas pueden fundirse suavemente con la matriz circundante; ello entorpece la definición de sus límites exactos y, en consecuencia, constituye una fuente de error en las medidas muy frecuente, contra lo cual el investigador de campo debe estar prevenido. Otro riesgo: las huellas "fantasma". En algunos casos, el peso del animal que dejó su huella provocó que ésta quedase impresa no sólo sobre la capa superficial del sedimento, sino también sobre capas más profundas. Hay que andar con cuidado y saber distinguir entre una huella real y una huella "fantasma": una impresión por debajo de la superficie. Por principio, el investigador tendría que examinar no sólo la huella sino también un molde de la misma. Si lo hallado es el molde, debería entonces estudiar además otro molde de éste: la huella desaparecida. Si se trata de una huella real deberá obtenerse un molde de la misma. Estos moldes se hacen aplicando yeso, látex o fibra de vidrio sobre las huellas en el campo. Proporcionan un registro valioso para estudios posteriores.

Otro elemento más del análisis de las huellas es la medida del grado de superposición de las impresiones de las patas delanteras sobre las traseras. Con la excepción de ciertos animales de cuerpo flexible, como la salamandra, la magnitud y consistencia de la superposición proporciona una segunda medida de la distancia entre la cadera y el hombro del cuadrúpedo. Todavía existe otra medida más, de gran utilidad, que determina la posición de las huellas con respecto a la línea media del rastro; esta medida informa sobre el modo de andar del cuadrúpedo. Si el paso es desgarbado, la línea media del rastro no se corresponderá exactamente con la de los puntos medios entre los pares de huellas.

Reconstrucción de animales desconocidos

Los riesgos que conlleva intentar reconstruir un animal del que sólo conocemos sus huellas fósiles quedan patentes en un ejemplo tomado del siglo XIX. El animal es el *Chirotherium* (nombre derivado de la raíz griega que significa "animal con manos"). Las huellas fueron descubiertas por primera vez en 1834 sobre una arenisca roja del Triásico (hace de 225 a 195 millones de años) en el estado de Turingia de Alemania central. Las huellas traseras tienen un tamaño parecido al de la mano de un hombre; cuatro de los dedos están dirigidos hacia delante, pero el quinto se encuentra formando un ángulo con los otros cuatro, tal como ocurre con el dedo pulgar de la mano humana. Algunas huellas traseras se asociaron con otras impresiones más pequeñas pero muy similares, que se consideraron huellas delanteras.

Aunque los animales terrestres dominantes en el Triásico fueron los reptiles, las huellas fósiles de Turingia se atribuyeron en principio a algún tipo de simio o de oso. Lo que ofuscó a quienes llegaron a esta conclusión fue una interpretación errónea: identificaron el dedo que formaba el ángulo con un pulgar, a pesar de estar situado en el lado exterior de las huellas. Es más, algunas reconstrucciones antiguas dibujan al *Chirotherium* como un anfibio con aspecto de sapo que caminaba con las patas cruzadas; al menos esto servía para situar el "pulgar" en una posición normal. En una conferencia que dio ante la Asociación Británica para el Progreso de la Ciencia, el zoólogo L. C. Miall demostró que las reconstrucciones basadas en la teoría de las patas cruzadas eran falsas y propuso que las huellas pertenecían a un dinosaurio. El que por lo menos fuesen huellas de reptiles resultó evidente cuando se reconoció que el rastro de *Chirotherium* era estrecho. Los rastros de anfibios son, invariablemente, anchos.

La prueba más convincente de que las huellas delataban el paso de un reptil fue el hecho de que las marcas mejor conservadas de *Chirotherium* mostrasen impresiones de escamas. Por otro lado, presentaban unas fuertes uñas, lo que sugería además que se trataba de un reptil carnívoro. Del análisis de las huellas se desprendía que el cuerpo del animal debía medir alrededor de un metro de largo y, puesto que predominaba la marcha bípeda, probablemente en posición erguida se equilibraba por medio de una cola de igual longitud. Teniendo en cuenta la cabeza y el cuello, la longitud del *Chirotherium* desde la punta del hocico hasta el extremo de la cola debe resultar próxima a dos metros y medio.

Se sabe ahora que el animal que dejó estas huellas fue un reptil pseudosuquio, importante grupo de reptiles primitivos, antepasados de los dinosaurios y de los cocodrilos. Aunque se conocen casi dos docenas de especies de *Chirotherium,* clasificadas a partir de las huellas, se han encontrado sólo unos cuantos esqueletos fósiles de los tipos correspondientes. Uno de ellos, *Ticinosuchus,* descubierto hace menos de 20 años en una formación del Triásico medio de Suiza, posee las características más afines al que dejó las huellas que tanto confundieron a los paleontólogos del siglo XIX.

Del mismo modo que las impresiones de escamas de ciertas huellas de *Chirotherium* ayudaron a establecer la naturaleza reptiliana del animal, así otras huellas revelan rasgos de las partes blandas que muy raramente quedan fosilizadas. Un ejemplo lo constituyen las huellas de hadrosaurio halladas en formaciones del Cretácico superior de la provincia de Alberta, en Canadá. Los hadrosaurios fueron grandes dinosaurios bípedos y herbívoros. Las huellas de Alberta revelan que, como ocurre con

los actuales elefantes, habían desarrollado almohadillas en las plantas y sobre los dedos de sus patas traseras, para amortiguar su gran peso.

Huellas y comportamiento

Las huellas fósiles han demostrado ser a la vez informativas y correctivas acerca del comportamiento individual y grupal de los animales que las dejaron. Dentro del grupo dinosaurio de los saurópodos, descritos por primera vez en 1842 por el zoólogo británico Richard Owen, se incluyen los mayores animales terrestres que vivieron jamás. Durante más de un siglo se creyó que estos macizos cuadrúpedos herbívoros, de largo cuello y prolongada cola, deberían haber sido acuáticos, siendo obligada su capacidad para flotar en el agua y soportar así su enorme peso. De hecho se había puesto seriamente en duda el que se hubieran movido nunca sobre la tierra. Roland T. Bird, del Museo Americano de Historia Natural, descubrió entonces huellas de saurópodos en las formaciones del Cretácico de Texas: en Paluxy Creek en 1944 y en West Verde Creek en 1954. Sus hallazgos fueron decisivos para resolver el problema. Un rastro de brontosaurio procedente de Paluxy Creek, expuesto hoy en el Museo Americano, resulta concluyente y dramático. Se trata de un rastro estrecho, con unas huellas enormes profundamente grabadas sobre lo que sólo pudo haber sido una planicie de barro, parcial o completamente expuesta al aire. Las pisadas del animal, que están al menos a dos metros una de otra, pertenecen sin duda a un animal terrestre de locomoción eficaz. Demasiado para el supuesto medio acuático habitual. El drama viene determinado por algo más: superpuestas a las huellas del brontosaurio aparecen las huellas de un gran dinosaurio carnívoro bípedo (posiblemente *Allosaurus*) moviéndose en la misma dirección: el carnívoro andaba a la caza del herbívoro.

En la otra localidad de Bird, West Verde Creek, además de las huellas de saurópodos se observa un surco continuo y profundo. Evidentemente, lo abrió la robusta cola del dinosaurio y es una prueba de que la llanura de barro estaba completamente al descubierto, confirmando que los saurópodos caminaban perfectamente, sin necesidad de sumergirse en el agua. Esto no significa, sin embargo, que esos dinosaurios gigantes no se desplazasen nunca nadando. Otro de los hallazgos de Bird aporta información a este respecto. Se trata de una serie de impresiones de las patas delanteras solamente, con la excepción de una única marca de la pata trasera izquierda. Según se desprende, la cola y los cuartos traseros del animal se mantenían a flote en aguas suficientemente someras como para permitirle caminar sobre el fondo con las patas delanteras, como hace hoy día el hipopótamo. Para girar a la izquierda, el saurópodo produjo la huella suplementaria al dar una patada sobre el fondo con una de las patas traseras.

Las reconstrucciones tradicionales de estos herbívoros gigantes los representan a flote, paciendo con aire satisfecho las plantas acuáticas mientras que sus enemigos naturales, los dinosaurios carnívoros, permanecen en la orilla, frustrados en la persecución de sus presas por el agua. Las huellas del State Dinosaur Park en Rocky Hill, Connecticut, sugieren una escena distinta. Allí, cientos de huellas del género depredador *Eubrontes* quedaron preservadas en sedimentos del Jurásico inferior. Algunas aparecen nítidas, otras son débiles; las hay impresas profundamente, otras son someras. Todas muestran los tres dedos característicos de un dinosaurio bípedo carnívoro. Un rastro en particular, descubierto por Walter P. Coombs, Jr., del Western New England College, arroja luz sobre la aptitud para la natación de los dinosaurios carnívoros. Consta de ocho huellas sucesivas, con una separación de alrededor de un metro entre cada pisada. La pisada correspondiente al avance del pie derecho es siempre unos 20 centímetros más larga que la dejada por el pie izquierdo, lo que hizo pensar a Coombs que los movimientos natatorios tuvieron un tipo de ritmo galopante. Además, algunas de las huellas presentan marcas excepcionalmente claras de uñas, excluyendo la posibilidad de que se trate de huellas "fantasma"; no hay, sin embargo, ninguna indicación de que el animal apoyase el peso sobre sus pies. De acuerdo con la interpretación de Coombs, el animal nadaba en aguas poco profundas, tocando el fondo con las puntas de los dedos. Por otra parte, la secuencia de huellas comienza y acaba bruscamente, lo que revela que, en el movimiento de natación, el animal se elevaba intermitentemente del fondo. Coombs concluye que la imagen tradicional del frustrado carnívoro que se queda en la orilla del agua necesita ser revisada.

Hasta hace muy poco, las pruebas fósiles en favor de una agrupación social de los dinosaurios han sido bastante escasas. Se cita el ejemplo de la acumulación de más de 20 esqueletos en una formación del Cretácico inferior de Bernissart, Bélgica. Todos los animales fueron grandes herbívoros bípedos del género *Iguanodon*. Se ha mantenido durante mucho tiempo que podrían haber muerto al caer una manada completa al fondo de un barranco de caliza, explicación que supone una prueba muda de que los iguanodontes se desplazaban en manadas. David Norman, de la Universidad de Oxford, acaba de demostrar que no hay tal formación, sino una serie de capas y que los fósiles no



9. HUELLAS DE AVE, esparcidas por un yacimiento de sedimentos mesozoicos en la Columbia Británica, el de la famosa localidad del cañón del río Peace. Allí, en 1922, se descubrió un gran número de huellas de dinosaurio. De las aves costeras que dejaron éstas no queda otra constancia en el registro fósil. Sus huellas constituyen los únicos vestigios de vida de aves hallados en estratos del Cretácico inferior.

se recuperaron todos del mismo nivel. Sus hallazgos plantean serias dudas sobre la interpretación de la manada.

Otros dinosaurios sociales

Un segundo ejemplo aducido concierne a la acumulación de esqueletos de dinosaurios hallada en una formación triásica de Ghost Ranch, Nuevo México, en 1947. Todos los animales pertenecían al mismo género, el pequeño carnívoco *Coelophysis*. De nuevo, algunos ven en ello una prueba de que estos carnívoros cazaban en manadas, mientras que otros lo consideran un fenómeno inexplicable de acumulación. Naturalmente, por su carácter fósil no puede esperarse que los restos de esqueletos proporcionen pruebas directas acerca del comportamiento del animal.

Una fuente de datos son los nidos construidos por dinosaurios. Los descubrimientos realizados en Mongolia en el año 1920 de nidos de dinosaurios que contenían huevos que no habían sido incubados, dispuestos simétricamente como huevos de pájaro, fue la noticia paleontológica del momento. Un nido perteneciente a un pequeño dinosaurio cuadrúpedo, el género *Protoceratops,* demostró que, a diferencia de ciertos reptiles modernos como la tortuga, estos animales de Cretácico pudieron haber defendido los huevos sin incubar. Junto al nido apareció el esqueleto fosilizado de un coelurosaurio depredador (un pequeño dinosaurio bípedo) que, por lo visto, había encontrado una muerte violenta. Su descubridor asignó el fósil a un género nuevo, al que apropiadamente llamó *Oviraptor*.

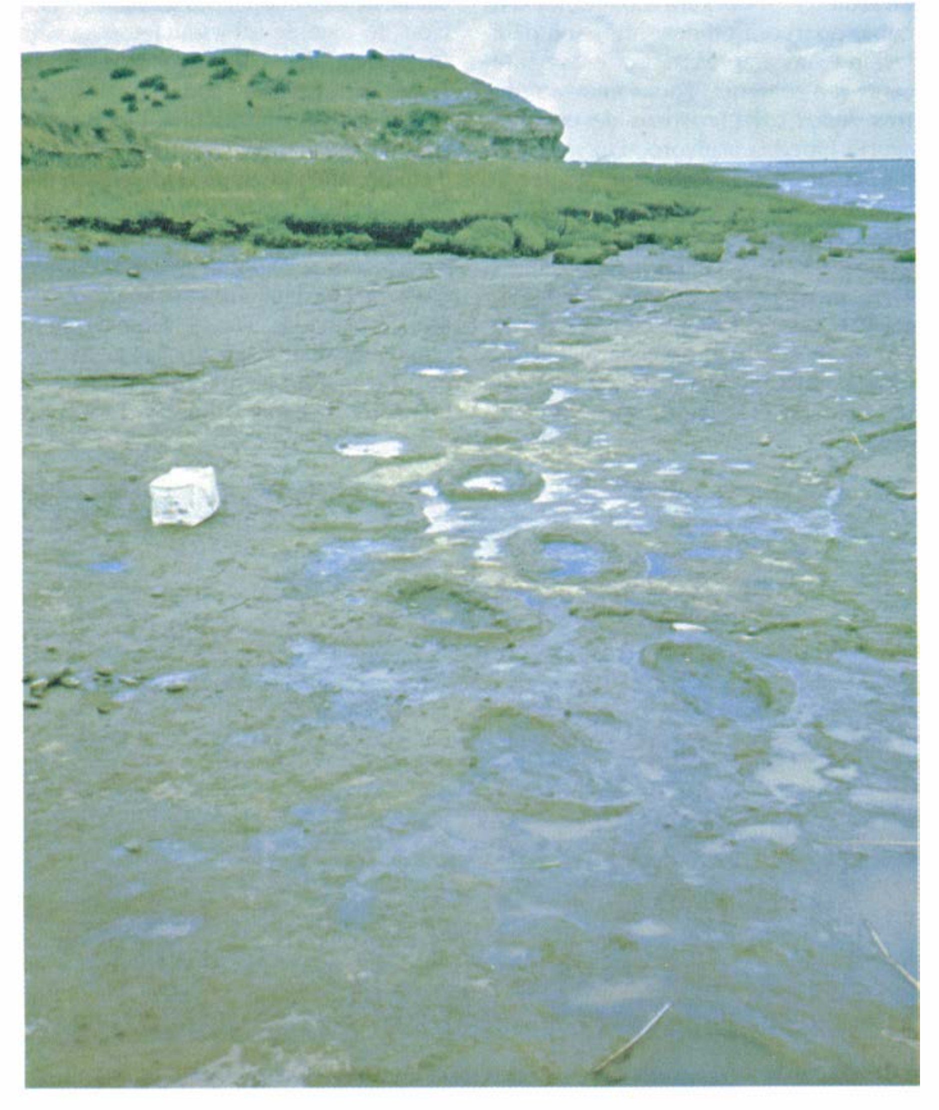
El segundo hallazgo de un nido, ocurrido hace solamente dos años en Montana, retoma la historia de la sociabilidad de los dinosaurios. En la formación Two Medicine, un depósito del Cretácico, John R. Horner, de la Universidad estatal de Montana, halló los esqueletos de 18 crías de hadrosaurios. Se les asignó una o dos semanas de edad. Su persistente asociación con un nido sugiere fuertemente un comportamiento social fraternal e implica también la posibilidad de que las crías recibiesen cuidados paternos después de la eclosión.

¿Qué conducta social puede inferirse de las huellas? A este respecto, la primera prueba clara de que los dinosaurios se agrupaban en manadas llegó de las dos localidades de Texas estudiadas por Bird. Unas veinte huellas de saurópodos de las que él descubrió aparecen en disposición paralela, que indican movimiento en la misma dirección, y muy pocas presentan superposición. Además, las pisadas difieren en tamaño, lo que revela que la manada congregaba animales maduros e individuos jóvenes.

Pocos años después del descubrimiento de Bird, John H. Ostrom, de la Universidad de Yale, descubría 25 series de huellas de dinosaurios en una formación del Cretácico inferior en Lake Eanes, Texas. Todas señalaban el paso de bípedos herbívoros, probablemente del género *Camptosaurus*. Los animales avanzaban en una misma dirección: hacia el noroeste. Ostrom también encontró indicios sugestivos de un comportamiento de caza en manada entre los dinosaurios carnívoros cuyas huellas quedaron conservadas en los sedimentos triásicos de Mount Tom en Massachusetts. Sobre un plano de estratificación se han encontrado al menos 19 huellas distintas del género de dinosaurios *Eubrontes*. Nuevamente se observaba que todos los animales iban en una misma dirección. Y habían marchado a la par, puesto que ninguno de los rastros se superponía.

De este modo las evidencias de las huellas revelan claramente que al menos algunos dinosaurios herbívoros observaron un comportamiento gregario. Esto representa en sí mismo una conducta social avanzada que no tiene paralelismo entre los reptiles actuales. Basándose en las huellas encontradas por Bird en Texas, Robert T. Bakker, de la Universidad John Hopkins, ha llegado a sugerir incluso que estos saurópodos se movían en manadas "estructuradas", con los miembros más jóvenes en el centro y los individuos adultos formando en la periferia un cinturón de protección. Serían muy bien recibidos nuevos datos que probasen que esta disposición estructurada fue deliberada, y no una agrupación fortuita.

En los últimos años el inventario de



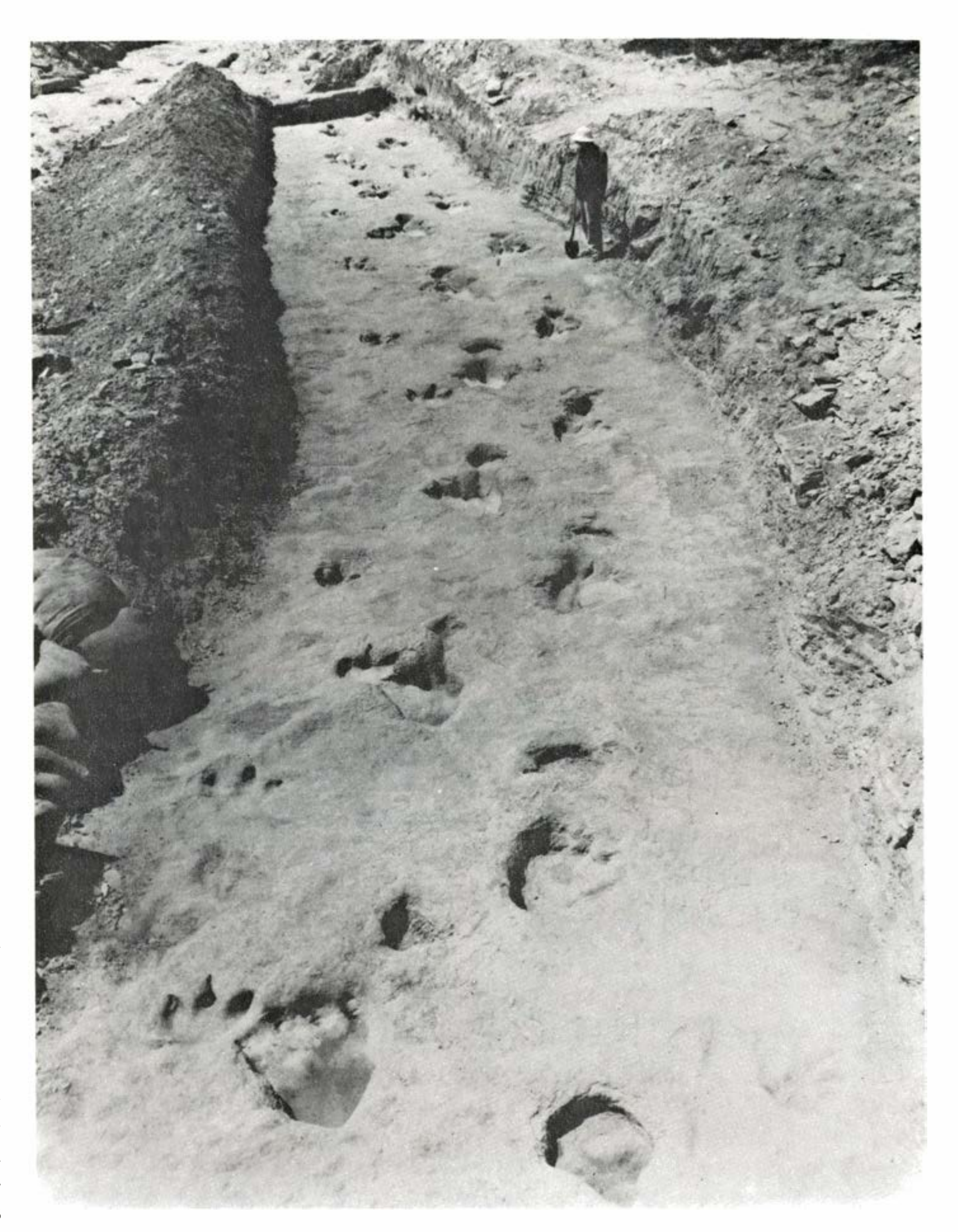
10. HUELLAS DE UN ANIMAL LENTO, del tamaño de las de un elefante, cruzan la formación río Negro, en Argentina. La pisada se imprimió en el Plioceno superior, hace 3,5 millones de años.

las huellas fósiles se ha incrementado notablemente con trabajos realizados con urgencia en el Cretácico medio del Cañón del río Peace, en la Columbia Británica. La riqueza en pistas de este cañón de 11 kilómetros largos se conocía ya desde que en 1922 Charles M. Sternberg, del Royal Ontario Museum, descubrió allí 400 huellas de dinosaurios. Sus hallazgos los dio a conocer en 1930 y describió ocho tipos nuevos de huellas, todas realizadas por dinosaurios, y todas, excepto una, mostrando una marcha bípeda.

Una bonanza en Canadá

En 1975 comenzó la construcción de una gran presa aguas abajo de la localidad donde se encuentran los descubrimientos de Sternberg. Ante la amenaza, el Museo de Historia Natural de Alberta se aprestó a concentrar sus esfuerzos por rescatar, antes de la inevitable inundación, algunas de las restantes huellas fósiles que, presumiblemente, debían existir en las zonas del cañón no inspeccionadas. Cinco campañas de trabajo bajo la dirección de Philip Currie cosecharon resultados espectaculares.

Aunque sólo se pudieron examinar los 6,5 kilómetros del curso inferior del cañón, se desenterraron más de cien rastros, con un total de 1700 huellas de dinosaurios, representativas de 10 especies distintas por lo menos, una serie de huellas de ave y un rastro de tortuga. Se han cartografiado ya más de mil de estas huellas y medido casi otras tantas. Se han realizado moldes de unas doscientas marcas y 90 de ellas se han recuperado del yacimiento para un estudio más detenido de las mismas y su posterior exhibición al público.



11. DOS RASTROS DE TEXAS registran un dramático episodio del Mesozoico. Descubiertas por Roland T. Bird en Paluxy Creek en 1944, la serie de huellas mayores corresponden a un dinosaurio cuadrúpedo herbívoro, probablemente un brontosaurio. Las huellas tridáctilas más pequeñas, visibles a la izquierda de la huella grande, pertenecen a un dinosaurio carnívoro bípedo, posiblemente del género *Allosaurus*. El carnívoro se movía en la misma dirección que el herbívoro, sin duda en su persecución.

Entre las espléndidas huellas de dinosaurios se conserva una serie completa del crecimiento (desde juvenil hasta adulto) de un hadrosaurio primitivo. Muestra cómo cambiaba la forma de las patas del animal a medida que alcanzaba la madurez y aumentaba el peso, constituyendo un registro sin precedentes en la icnología. Una manada de estos herbívoros parece haberse movido a través de los sedimentos cretácicos con sus componentes dispersados a lo largo de un ancho frente y caminando algunas veces unos al lado de otros. A juzgar por las frecuentes sobreimposiciones de huellas juveniles sobre pisadas de adultos, se deduce que los más jóvenes caminaban detrás de los mayores. Una serie de huellas señala que 11 individuos, luego de viajar cierto tiempo hacia el sur, giraron de repente hacia el este. (La existencia de un rastro único de hadrosaurio que se movió en dirección opuesta, desde el sur hacia el norte, revela que el giro a la izquierda no fue dictado por ninguna obstrucción natural). Un estudio más detallado de cuatro de los once rastros ha puesto de manifiesto incluso que, al dar uno de los hadrosaurios un bandazo hacia un lado, otros tres se apartaron para evitar la colisión.

Las marcas del río Peace se han sumado también a las pruebas que manifiestan que los dinosaurios carnívoros de tamaños pequeños a medianos cazaban en grupo. Así, en una localidad, seis rastros de carnívoros de tamaño medio están todos orientados en la misma dirección, aunque dos de las huellas se cruzan mutuamente dos veces. En contraste, los rastros de los carnívoros, mayores, hallados en el cañón (probablemente tiranosaurios) delatan pasos solitarios o, a lo sumo, de parejas. En resumen, no hay ninguna prueba que demuestre que los grandes carnívoros cazasen en manadas.

Las huellas ayudan también a deducir la velocidad con que circulaban los animales que las produjeron, aunque debe tenerse gran cuidado en su interpretación. Un ejemplo que hace al caso nos lo ofrecen las huellas de dinosaurios descubiertas a principios de los años 60 en una cantera inglesa. Cerca

de Herston, en Dorset, afloran las capas de Purbeck, una formación del Cretácico superior. Sobre el fondo de la cantera se han desenterrado líneas paralelas de huellas de un herbívoro bípedo. Se supuso en un comienzo que correspondían a un solo animal. La longitud moderada de la zancada sugería que el dinosaurio avanzaba pesadamente; un especialista llegó a proponer incluso que, habida cuenta de que el animal apoyaba todo su peso sobre la planta de sus pies, debía de estar ascendiendo con caminar lento por lo que en aquella época sería una fuerte pendiente. Esta visión se ajustaba a la imagen de animales lentos y perezosos que entonces se tenía de los dinosaurios. Sin embargo, al ampliarse la cantera se descubrió que las dos huellas divergían; no las había dejado un dinosaurio que subía lentamente una pendiente, sino dos mucho más rápidos que posiblemente corrían uno al lado del otro.

Las pruebas aportadas por las huellas del río Peace demuestran sin ambages que algunos dinosaurios se movían con bastante rapidez. Gracias a una fórmula desarrollada por R. McNeill Alexander, de la Universidad de Leeds, la velocidad del movimiento del animal puede calcularse a partir de la observación del modelo y espaciamiento de sus huellas. Las velocidades más altas registradas entre las huellas del río Peace corresponden a las de los carnívoros de tamaño medio: 16,5 kilómetros por hora. Esta velocidad es cercana a la velocidad máxima que alcanza un ser humano. Los otros carnívoros se desplazaban a velocidades más bajas: entre 6 y 8,5 kilómetros por hora. Los herbívoros avanzaban más lentos. Su velocidad máxima, 6 kilómetros por hora, coincide con la marcha más pausada de los carnívoros.

En conjunto, pues, los estudios recientes sobre huellas demuestran que la imagen que predominó durante tanto tiempo, y que hablaba de los dinosaurios como animales esencialmente solitarios, de movimientos lentos e incluso torpes y de corta inteligencia, está muy lejos de la verdad. Cuando se realicen análisis igualmente detallados de las huellas fósiles de otros vertebrados terrestres (por ejemplo anfibios, otras clases de reptiles y los mamíferos del Cenozoico inferior) se obtendrá nueva información sobre su comportamiento que, a buen seguro, discrepará de las conclusiones del pasado. ¿Estamos ahora ante un renacimiento del estudio de las huellas fósiles? Todo indica que las próximas décadas asistirán a un despertar apasionado de esta rama de la paleontología.

Espectroscopía de RMN de células vivas

Las reacciones químicas del metabolismo se han venido estudiando una a una en el tubo de ensayo. La resonancia magnética nuclear (RMN) permite seguir la evolución de las mismas a medida que se desarrollan en los propios tejidos

R. G. Shulman

A mediados del siglo XIX, Louis Pasteur revelaba que, en las células, se producían reacciones químicas específicas: demostró que la levadura, que fermenta los hidratos de carbono convirtiéndolos en sustancias tales como el dióxido de carbono y el alcohol etílico, estaba formada por células vivas. En las postrimerías del siglo, los hermanos Buchner, Eduard y Hans, tras moler células de levadura, observaron que los hidratos de carbono añadidos a la disolución resultante se convertían en los mismos productos finales. Y así establecieron que las sustancias contenidas en el interior de las células de la levadura catalizaban reacciones químicas. Este descubrimiento señaló la estrategia a seguir para el progreso de la bioquímica. En lo que llevamos de siglo, los bioquímicos se han aprestado a desentrañar las transformaciones químicas que se desarrollan en el interior celular mediante la extracción, primero, y purificación posterior de las sustancias contenidas en el mismo. Diferentes investigadores han estudiado distintas reacciones, para así esclarecer los intrincados caminos que constituyen el metabolismo intracelular. Aunque hay aspectos del metabolismo por explorar todavía, al cruzar, unir y volver a recorrer las vías de las reacciones ya conocidas, podemos comenzar a esbozar la estructura de la propia célula.

Las objeciones contra la validez de la bioquímica moderna, allí donde persisten, continúan centrándose en la reducción de los procesos biológicos a secuencias de reacciones químicas. "Admitamos que las reacciones puedan tener lugar en el tubo de ensayo –se dice– ¿pero se procede del mismo modo en el interior de la célula viva? ¿Qué ocurre cuando se trata de organismos pluricelulares?" Vamos a describir aquí una técnica que está empezando ya a responder a esas preguntas. ¿Cómo? Detectando las reacciones químicas a medida que se van desarrollando en las células, tejidos y organismos, hombre incluido. La técnica a que me refiero es la espectroscopía de resonancia magnética nuclear (RMN). Se apoya en una característica de determinados núcleos atómicos con un número impar de nucleones (protones y neutrones): poseer un magnetismo intrínseco que convierte a cada uno de tales núcleos en un dipolo magnético, en un imán. Entre esos núcleos se cuenta el protón (H-1), que es el núcleo del 99,98 por ciento de todos los átomos de hidrógeno que existen en la naturaleza, el núcleo de carbono-13 (C-13), que es el núcleo del 1,1 por ciento de todos los átomos de carbono, y el núcleo del fósforo-31 (P-31), que lo es de todos los átomos de fósforo.

En la espectroscopía de RMN se aplican dos campos a las células, tejidos o partes de un organismo vivo. Se trata el primero de un campo magnético intenso que provoca la orientación de los propios dipolos nucleares (los núcleos del hidrógeno-1, carbono-13 y fósforo-31 de la muestra): el dipolo de cada núcleo se alinea en el sentido del campo o contra el mismo. La alineación con el campo representa un estado en el que el núcleo almacena menos energía que cuando está alineado en sentido contrario al campo.

Se aplica entonces el segundo campo, que consiste en una radiación electromagnética en la zona de radiofrecuencia del espectro. Para cualquier intensidad del campo magnético donde se coloque la muestra, existe una determinada frecuencia de la radiación electromagnética en la que cada fotón, o cuanto de radiación, transmitirá exactamente la cantidad correcta de energía para que cambie la alineación de cierto tipo de núcleo. Si se mantiene constante la intensidad del campo magnético y se varía la radiofrecuencia (o inversamente, permanece constante la radiofrecuencia y varía la fuerza del campo magnético), llega un momento en que dicho tipo de núcleos resuenan: absorben los radiofotones. Sea, por ejemplo, un campo magnético con una intensidad de 84.000 gauss; el núcleo de hidrógeno-1 resonará a una frecuencia de unos 360 megahertz (360 millones de ciclos por segundo), el núcleo de fósforo-31 lo hará a unos 146 megahertz y el de carbono-13 resonará a 90 megahertz, aproximadamente.

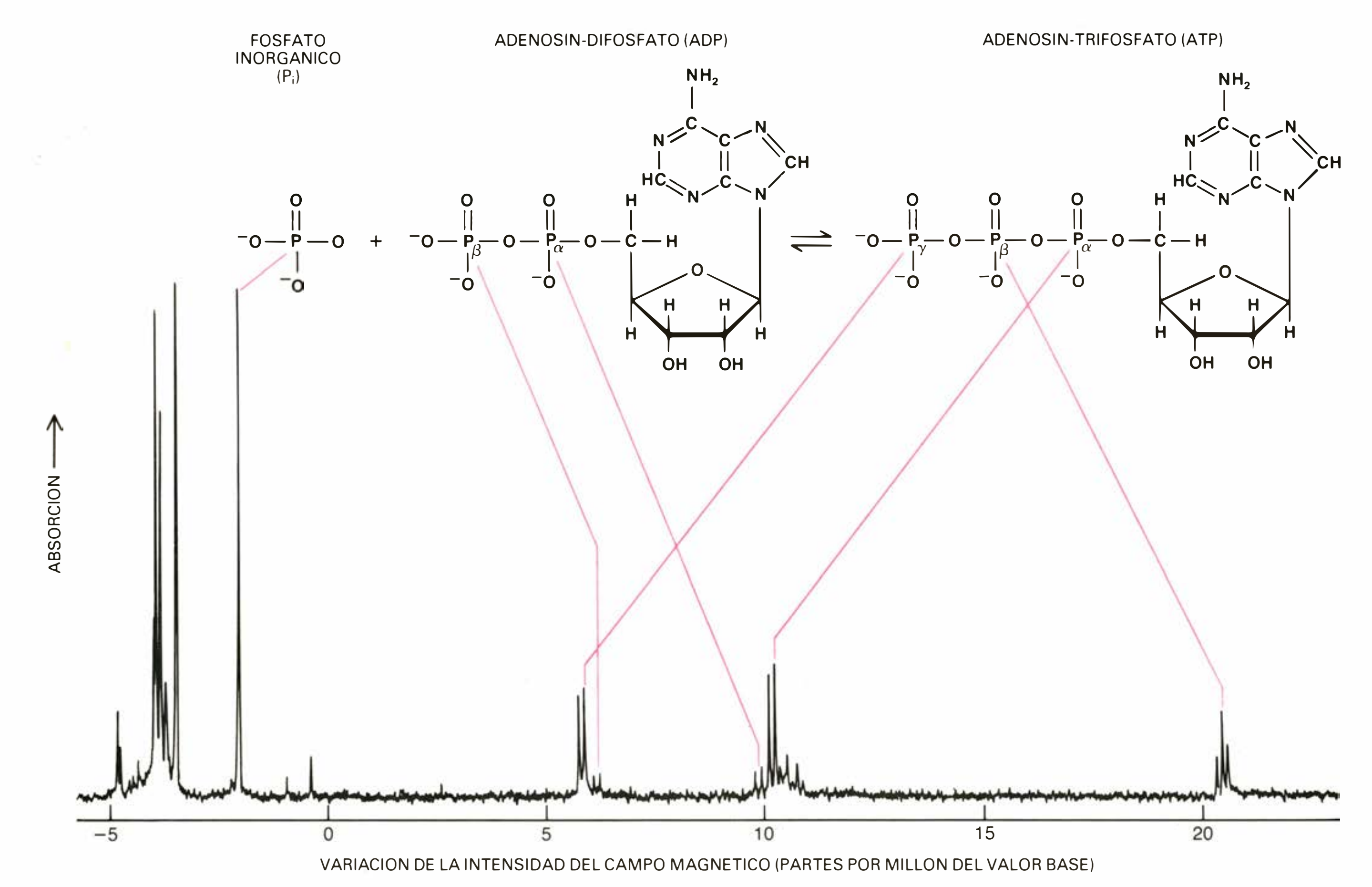
En las células, tejidos y organismos la frecuencia exacta de la resonancia depende de otra circunstancia más: el entorno químico de los núcleos. Esta frecuencia sufre un "desplazamiento químico", o sea, difiere del valor que tendría si los núcleos estuviesen aislados, puesto que en las células, tejidos y organismos dichos núcleos forman parte de los átomos y éstos son, a su vez, integrantes de las moléculas. Consideremos un espectro de RMN que ilustre las resonancias (en forma de picos o líneas de absorción) en una muestra del aminoácido glutamato. Aunque el carbono-13 tiene una abundancia natural de sólo un 1,1 por ciento, los picos procedentes del C-13 en los cinco carbonos de la molécula de glutamato se distinguen con nitidez; si sacamos el espectro variando la intensidad del campo magnético, se extenderán a lo largo de un intervalo de unas 200 partes por millón (0,02 por ciento de la intensidad del campo). Dos de los átomos de carbono de la molécula del glutamato se hallan unidos, cada uno por su lado, a otros dos átomos de oxígeno (COO^-); sus correspondientes picos están muy cerca. Pero esos picos aparecerán muy separados con respecto al de un átomo de carbono que se encuentre enlazado con un átomo de hidrógeno; y también con

respecto a los picos de dos átomos de carbono unidos, cada uno, a dos átomos de hidrógeno.

En un espectro de RMN podemos asignar un determinado pico a un átomo de carbono que ocupe cierta posición de una molécula; disponemos de varias técnicas, la más directa de las cuales consiste en medir el espectro una vez marcada una posición particular con carbono-13, de suerte que el número de átomos de C-13 en aquella posición de una muestra de la sustancia resulta muy superior a lo que podría pronosticarse partiendo de la abundancia natural del C-13. En consecuencia, el pico de absorción procedente del carbono en dicha posición aparecerá aumentado. La técnica nos pone de relieve una de las ventajas que ofrece utilizar carbono-13 para estudiar las reacciones químicas del metabolismo: se puede seguir la trayectoria del C-13 introducido como marcador a medida que éste ocupa distintas posiciones en otras tantas moléculas.

El núcleo del fósforo-31 presenta sus propias ventajas. Por constituir el 100 por ciento de todos los núcleos de fósforo, no requiere ninguna técnica de marcaje. Da, además, fuertes señales de RMN en unos cuantos compuestos importantes. Cuando se aplica la espectroscopía de RMN a una suspensión de la bacteria *Escherichia coli,* se detectan picos procedentes de los tres átomos de fósforo en el adenosín-trifosfato (ATP), una molécula donde la célula almacena energía química. Se detecta un pico procedente de un átomo de fósforo en el fosfato inorgánico (P_i), que se escinde del ATP cuando se utiliza su energía. Asímismo, se detectan picos procedentes de los dos átomos de fósforo de la nicotinamida adenín dinucleótido, una molécula que toma parte en el proceso de oxidación intracelular. A veces, se registran picos del adenosín difosfato (ADP), que tiene un átomo de fósforo menos que el ATP, del fosfoenol piruvato, al que la célula puede recurrir para obtener el P_i necesario para la transformación del ADP en ATP, y, por último, de las cadenas de polifosfato.

Cuando las bacterias se nutren de glucosa, utilizan la secuencia de reacciones metabólicas englobadas en el proceso de glicolisis, o vía glicolítica. Las moléculas que se originan a lo largo de dicha secuencia, en particular la fructosa-1,6-bifosfato (FBP), pueden detectarse también. Estas moléculas dan picos agudos por RMN debido a su misma pequeñez (no llegan a mil veces la masa de un átomo de hidrógeno); las moléculas pequeñas en disolución oscilan rápidamente (del orden de 10^9 veces por segundo). La rápida oscilación significa que los enlaces químicos de la molécula pasan por todos los ángulos posibles respecto al entorno de la misma. En efecto, la oscilación promedia los ángulos de los enlaces respecto al entorno. Las macromoléculas, por contra, oscilan lentamente; las moléculas inmovilizadas en un sólido no oscilan en absoluto. Los picos de absorción procedentes de una determinada cantidad de tales moléculas quedan ensanchados por las contribuciones respectivas de los núcleos de las moléculas orientadas en distintos ángulos con relación a su entorno. Cabe, pues, que incluso una concentración elevada de núcleos de fósforo-31 en una sustancia



1. PICOS DE UN ESPECTRO DE RMN. Representan la absorción de las ondas de radio por los núcleos atómicos en posiciones específicas de las moléculas sometidas a un campo magnético cuando entran en resonancia con él. La parte superior de la ilustración muestra la reacción química que une el fosfato inorgánico (P_i) y el adenosín-difosfato (ADP) para formar adenosín-trifosfato (ATP), una molécula en la que la célula viva almacena energía química. La parte inferior de la ilustración recoge un espectro de RMN del fósforo-31 contenido en células tumorales de ratón. Casi todos los picos de absorción del espectro corresponden a núcleos de átomos de fósforo-31 (P-31) presentes en las moléculas indicadas en la parte superior. La razón de que el pico debido al gamma-P-31 del ATP y el pico debido al beta-P-31 del ADP se hallen tan cerca obedece a que esos átomos de fósforo coexisten en un entorno químico similar. El pico procedente del beta-P-31 en el ATP está más aislado porque su entorno es único: se trata del único flanqueado por grupos fosfato.

de este tipo pase sin dejar constancia en los espectros de RMN ante esa dilatación excesiva de los picos de absorción.

Entre los picos observables del fósforo-31, el correspondiente al fosfato inorgánico ha sido el que menos dificultades ha ofrecido a la hora de identificarlo y el más rico en información. El fosfato inorgánico existe en el interior de las células en combinación con uno o dos protones. A un *p*H intracelular de 6,7, las poblaciones de la forma protonada y la doble protonada son iguales; a valores más altos (o sea, en un entorno más alcalino), domina la forma de protonación simple, mientras que a un *p*H más bajo (un entorno más acídico) predomina la doblemente protonada. Cada forma presenta un claro desplazamiento químico, aunque el pico del fosfato inorgánico en un espectro de RMN obtenido de una población de células aparecerá en alguna posición intermedia según el promedio de protonación de todo el P_i que contengan aquéllas.

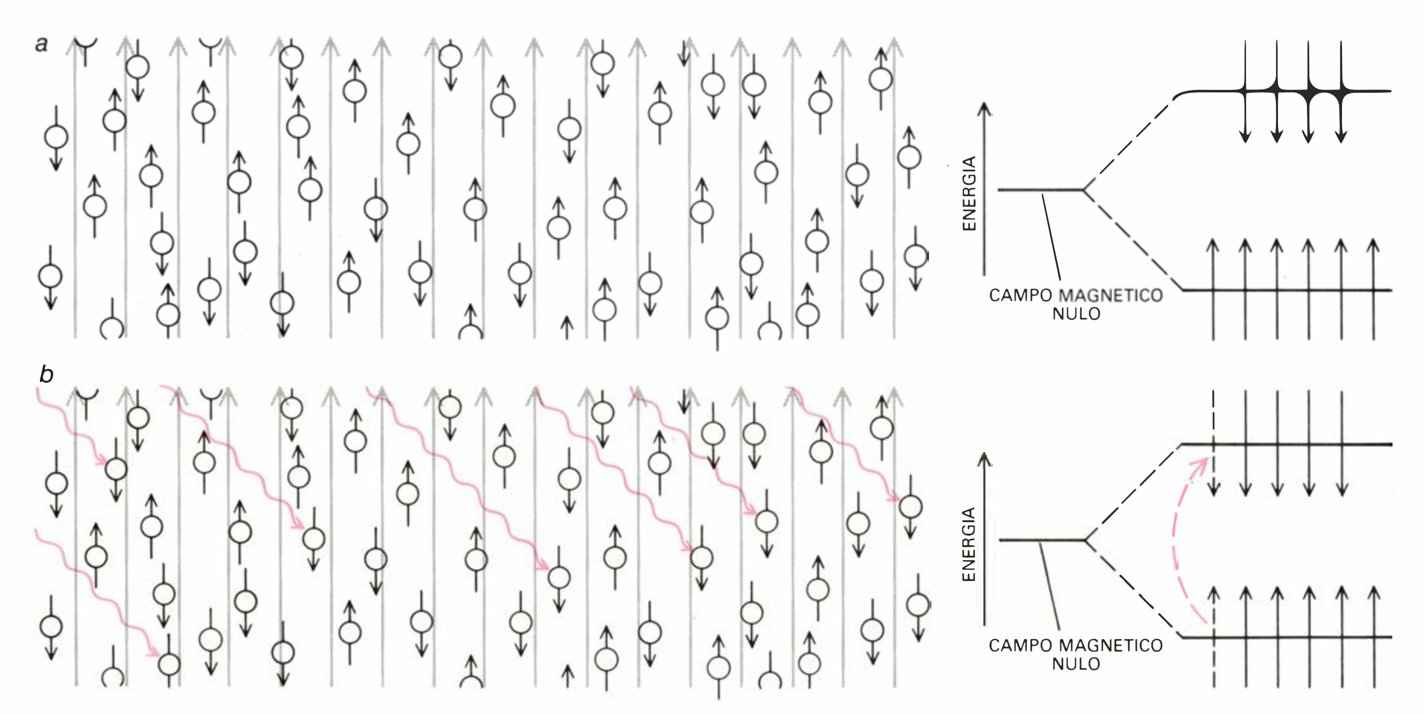
Por consiguiente, la posición del pico del P_i da una medida exacta de su grado de protonación, lo que facilita, a su vez, una determinación precisa del *p*H intracelular. Hace unos años, trabajando conmigo en los laboratorios Bell, Gil Navon y Kamil Ugurbil demostraron, mediante esta técnica, que el *p*H del interior de *E. coli* se mantenía bastante constante en 7,4 cuando las bacterias disponían de una fuente de energía, glucosa por ejemplo. En los mismos espectros de RMN puede seguirse la transformación de glucosa en FBP, así como el posterior incremento de la concentración de ATP a medida que la célula va almacenando la energía adquirida.

El bioquímico británico Peter Mitchell ha propuesto que la interconversión celular del ATP en ADP y fosfato inorgánico se acopla al paso de los protones a través de la membrana de la célula. En concreto, la reacción que libera energía química por escisión del ATP para formar ADP y P_i sirve para acarrear fuera protones de la célula, creando así un gradiente de protones que almacena energía eléctrica y química. Y al revés, la reincorporación de los protones a la célula suministra la energía necesaria para la reacción que combina el P_i y el ADP en ATP. La variación de la concentración de protones en el interior de la célula se refleja en la variación del *p*H intracelular; de ahí que el desplazamiento químico del pico correspondiente al P_i en los espectros de RMN corrobore la hipótesis de Mitchell.

El ensayo comienza por aportar glucosa a una población bacteriana de *E. coli* que ha agotado su fuente de alimento. El *p*H de tales células habrá caído a un valor considerablemente inferior a 7,0. A medida que las células metabolizan la nueva glucosa, se observa que el pico debido al fosfato inorgánico se desdobla. Uno de ellos, correspondiente a un *p*H de 7,4, procede del P_i del interior celular. El otro, correspondiente a un *p*H menor (que significa una mayor concentración de protones), se origina del P_i procedente del medio donde están suspendidas las células. Los picos confirman el establecimiento de un gradiente de protones. Al mismo tiempo aumentan los picos debidos al ATP.

La reacción que desdobla ATP en ADP y fosfato inorgánico se cataliza por la ATPasa, un enzima que acopla la reacción con el transporte de protones a través de la membrana celular. Si a la suspensión de *E. coli* se añade, además de la glucosa, una sustancia que inhiba la acción de la ATPasa, volveremos a observar cómo se consume el azúcar. Empieza a aparecer FBP y luego ATP. No obstante, y aun cuando se han formado cantidades apreciables de ATP, el pico del P_i nos revela que no se genera un gradiente de protones. El aporte de glucosa dura mucho más que antes, lo que demuestra que se invierte una fracción apreciable del consumo celular de ATP en el mantenimiento del gradiente de protones.

La importancia que revisten los espectros de RMN en el estudio del metabolismo queda bien ilustrada en una serie de experimentos realizados sobre tejido muscular por George K. Radda, David G. Gadian y sus colaboradores de la Universidad de Oxford. En 1974, demostraron que los espec-



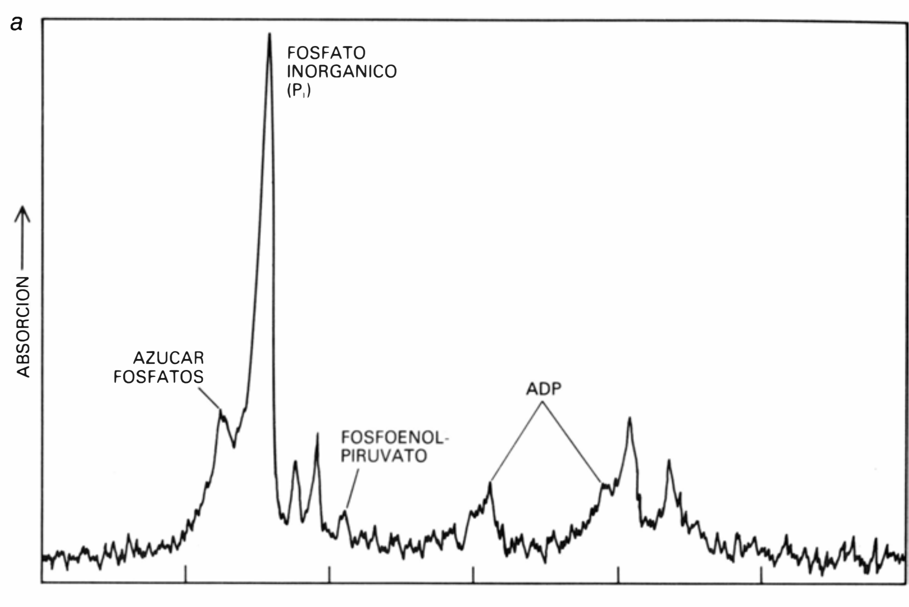
2. MAGNETIZACION INTRINSECA de ciertos núcleos (los de hidrógeno-1, carbono-13 y fósforo-31 incluidos). Tal propiedad posibilita la espectroscopía de RMN, porque cada uno de esos núcleos actúa como el equivalente de un imán. En un campo magnético intenso, los núcleos se alinean o bien con el campo o contra el mismo (*a*). Si a continuación los núcleos se bañan en ondas de radio, pueden absorber los cuantos de radiación que les comunican la energía para "pasar" de la alineación a la antialineación (*b*). Los tipos de núcleos y los entornos químicos donde se encuentran determinan las combinaciones particulares de radiofrecuencia e intensidad de campo magnético en que las absorciones aparecen en forma de picos (o "líneas") en el espectro de RMN.

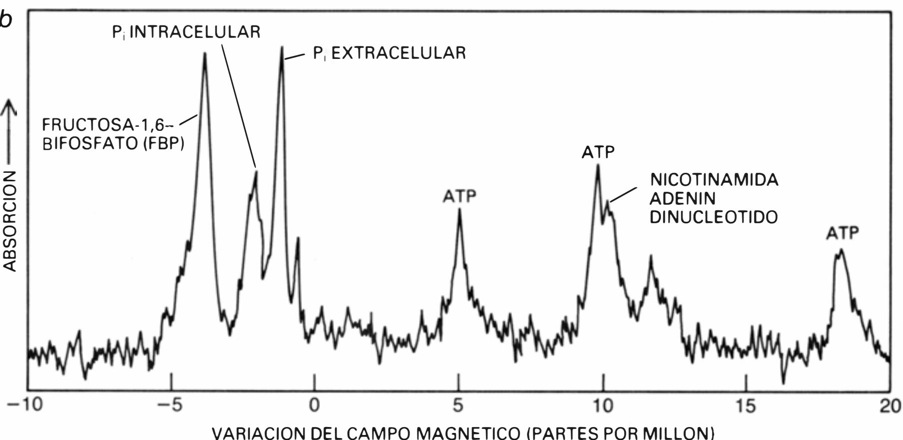
tros de RMN podían utilizarse para observar el metabolismo del tejido muscular vivo de rana. Los espectros revelaron la presencia de picos de fósforo-31 procedentes del fosfato inorgánico, del ATP y de la fosfocreatina (PCr), una molécula que las células musculares utilizan para transformar ADP en ATP. Al privar al músculo de una fuente externa de energía, los espectros reflejaron una pérdida de PCr y un nivel constante del ATP, mantenido por la reserva de PCr. El nivel del ATP sólo disminuía cuando se agotaba la PCr, dejando ADP y P_i. Las posiciones de los picos del ATP revelaron que el ATP celular formaba complejos con iones metálicos de carga positiva (posiblemente magnesio).

Estos trabajos introductorios (apoyados por experimentos similares realizados por Michael Barany, C. Tyler Burt y Thomas Glonek, del Hospital Clínico de la Universidad de Illinois) lograron obtener determinaciones que otros investigadores anteriores habían verificado por análisis químico de numerosas muestras de tejido muscular obtenidas en diversos momentos después de la alimentación del tejido. Los estudios posteriores avanzaron todavía más. Puesto que la función del músculo consiste en efectuar trabajo, Gadian, con Douglas Wilkie y Joan Dawson, de la Facultad de Medicina del University College londinense, se esforzaron por conseguir que los picos del fósforo-31 y los espectros de RMN revelasen las correlaciones existentes entre los metabolitos y la fatiga del músculo: la disminución de la fuerza muscular después de un ejercicio prolongado. Para ello suspendieron músculo de rana en una vasija muy parecida a un tubo de ensayo, que colocaron en el espectrómetro de RMN.

En unos experimentos se oxigenó la disolución que rodeaba el músculo; en otros, se desoxigenó. Un electrodo estimulaba al músculo provocando sus contracciones. La fuerza desarrollada por el tejido se medía en un indicador de tensión. Gadian y sus colaboradores concluyeron que la disminución de la fuerza guardaba una buena relación con el incremento de la concentración de ADP. Más aún: era proporcional a la tasa de consumo del ATP. Por otra parte, no dependía de la concentración de éste. Los experimentadores podían seguir la tasa de consumo del ATP midiendo la caída del nivel de la fosfocreatina, fuente del ATP muscular, y midiendo simultáneamente el nivel de fosfato inorgánico, que se origina a partir del consumo del ATP.

En los últimos dos años, el progreso



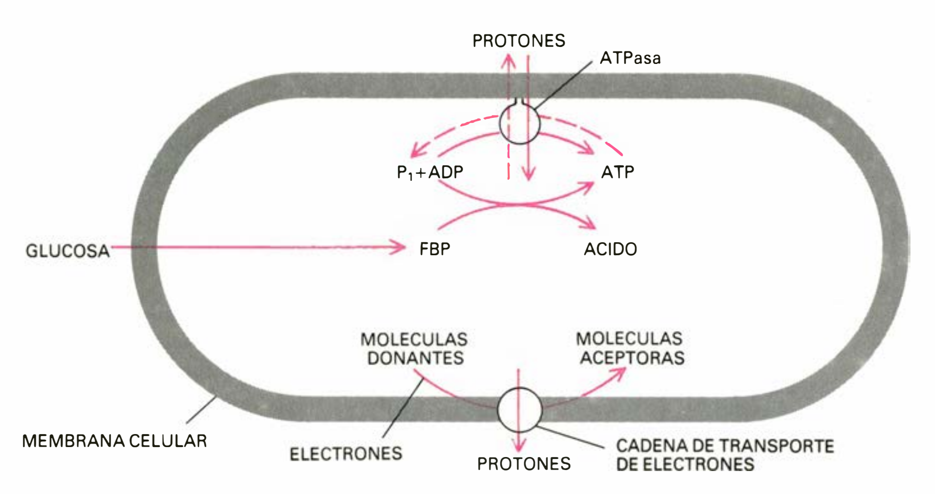


3. EFECTOS DEL CONSUMO DE GLUCOSA sobre los compuestos que contienen fósforo en la bacteria *Escherichia coli*. Estos espectros de RMN de fósforo-31, que se obtuvieron antes de administrar glucosa a las células (*a*) y entre cuatro y seis minutos después de la adición del azúcar (*b*), nos facilitan recorrer el proceso que sigue la vía metabólica de la glicolisis. En el segundo espectro se observa que el pico del fosfato inorgánico (P_i) se ha dividido. De las posiciones de los dos picos resultantes se desprende que el interior celular se ha convertido en más alcalino que el medio donde se hallan suspendidas las células. Los picos restantes corresponden a sustancias intracelulares; ADP, ATP y fructosa-1,6-bifosfato (FBP).

que ha experimentado la espectroscopía de RMN, unido a la construcción de nuevos espectrómetros, ha permitido extender el estudio del metabolismo a los músculos de las extremidades. Los primeros espectrómetros, construidos para estudios químicos, se habían diseñado de suerte que acomodaran muestras contenidas en un tubo cilíndrico. Dentro del aparato, tubo y muestra quedaban rodeados por una bobina que emitía una radiación de radiofrecuencia; se sumergían el tubo y la bobina en un campo magnético homogéneo y estático. Examinar un brazo o un pie en acción exigiría un aparato diferente.

En los nuevos espectrómetros se deposita una bobina plana sobre la superficie de la muestra. La bobina no excita la totalidad de la muestra con ondas de radio; sólo irradia su entorno inmediato. Constituye ello una ventaja, ya que el experimentador puede seguir así las reacciones químicas que se desarrollan en una región específica del tejido. Para circunscribir todavía más la región, puede ajustarse el campo magnético de los nuevos espectrómetros de suerte que sólo resulte homogéneo en un volumen de 1 o 2 centímetros cúbicos, detectándose a partir de este volumen picos de RMN agudos. En el resto del volumen sometido a la influencia del imán, el campo magnético es bastante inhomogéneo; vale ello decir que, si se absorben ondas de radio allí, dicha absorción se extiende por un amplio espectro de frecuencias o fuerzas de campo magnético y se funde con el ruido de fondo del espectro.

Combinando una bobina de superficie plana con un campo magnético focalizado, Radda y Gadian, en colaboración con investigadores de Oxford Research Systems, la compañía que construye los nuevos espectrómetros, han medido los picos de absorción del



4. MECANISMOS INTRACELULARES supuestamente responsables de las variaciones en los espectros de RMN ilustradas en la figura 3. El metabolismo de la glucosa conduce a la formación de FBP y, en último término, de ácido láctico. En los pasos finales del proceso el ADP se transforma en ATP. La energía contenida en el ATP puede ser liberada por el enzima de membrana ATPasa, que la aprovecha para extraer, del interior celular, protones (iones hidrógeno). Se produce entonces un gradiente de protones; la célula se vuelve alcalina respecto a su entorno. En las reacciones inversas, también catalizadas por ATPasa, se readmiten los protones y la energía recuperada se utiliza para sintetizar ATP. El mecanismo que se ilustra en la parte inferior del diagrama expele los protones de otro modo independiente.

fósforo-31 procedentes del hígado de ratas vivas y los han deslindado de los picos procedentes del tejido muscular inmediato. Sabían que sus espectros eran del hígado, ya que no presentaban picos de fosfocreatina, sustancia ausente de ese órgano y altamente concentrada en los músculos. Más recientemente, Radda, trabajando en equipo con investigadores clínicos dirigidos por Brian D. Ross, de Oxford, se ha ocupado de la aplicación de la espectroscopía de RMN al diagnóstico de enfermedades humanas. Los investigadores diagnosticaron un síndrome de McArdle en un paciente de 51 años. Este síndrome es un trastorno genético por el que se bloquea la acción de la fosforilasa. Dicho enzima participa en la transformación del glucógeno de los hidratos de carbono en glucosa, según lo van exigiendo las necesidades de las células musculares. Los que padecen este síndrome se fatigan al menor esfuerzo.

Para establecer el diagnóstico, se le pidió al enfermo que extendiese el brazo en el espectrómetro de RMN; se registraron los espectros de fósforo-31 de su antebrazo durante el ejercicio del mismo. Los investigadores habían ya demostrado que, en los músculos de individuos normales, el valor del *p*H disminuía con el ejercicio. En un caso bajó de 7,0 a 6,4, recuperándose luego en torno a 7,0 al interrumpirse el movimiento. Cuando el sujeto era un enfermo, el *p*H muscular empezó a 7,1 y aumentó a 7,2. También se observó que el pico debido a la fosfocreatina en los espectros del enfermo disminuía fuertemente durante el ejercicio.

Estas observaciones tienen su justificación: en ausencia de la acción de la fosforilasa, las células musculares del paciente no disponían de mucha glucosa que metabolizar en la vía glicolítica. Este proceso hubiese formado ácido láctico, cuya acumulación temporal reduce el *p*H de las células del músculo normal. La glicolisis hubiera también incrementado el aporte de ATP, de donde se saca la energía necesaria para el ejercicio muscular. En las células musculares del paciente, el ATP requerido se sintetizaba a partir de la fosfocreatina. El diagnóstico de la inactividad de la fosforilasa en dicho paciente se confirmó luego a través de una prueba química realizada en un espécimen de biopsia muscular. Ross y sus colaboradores afirman que el ensayo no invasor y exento de riesgo de la RMN posibilita no sólo el diagnóstico de enfermedades del tipo del síndrome de McArdle, sino también la evaluación del éxito del tratamiento.

La RMN lleva el examen hasta el mismo interior de la célula viva, permitiéndonos seguir las reacciones glicolíticas a través de las cuales se metaboliza la glucosa. En el proceso de glicolisis cada molécula de glucosa, que tiene seis átomos de carbono, se transforma en dos moléculas de ácido láctico, portadoras de tres átomos de carbono cada una. La correspondiente acidificación aparece en los espectros de RMN del fósforo-31 de tejido muscular sano como un desplazamiento del pico del fosfato inorgánico, en consonancia con la disminución del *p*H.

La transformación química de la glucosa puede contemplarse de una forma más directa: mediante espectroscopía de RMN de las células alimentadas con glucosa, en las que la mayoría de las moléculas están marcadas con carbono-13 en la posición designada C_1. De esta estrategia se sirvió, en mi laboratorio de la Universidad de Yale, J. A. den Hollander, quien así continuaba trabajos anteriores realizados en colaboración con Ugurbil y T. R. Brown. Esta vez se pretendía medir la velocidad de transformación de sustancias intermedias de la vía glicolítica en el interior de las células de levadura, para luego correlacionar esa velocidad con las propiedades de los enzimas que catalizan cada transformación.

Se sabía, desde hacía algún tiempo, que la velocidad de consumo de glucosa por las células de levadura era mayor en ausencia de oxígeno que en presencia del mismo. Este aumento constituye el llamado efecto Pasteur. Por tanto, den Hollander, Ugurbil y Brown empezaron midiendo los picos de glucosa en espectros de carbono-13 de una suspensión de células de levadura a las que habían suministrado moléculas marcadas. Los resultados demostraron con bastante claridad que el azúcar se absorbía y se consumía con doble rapidez en ausencia de oxígeno.

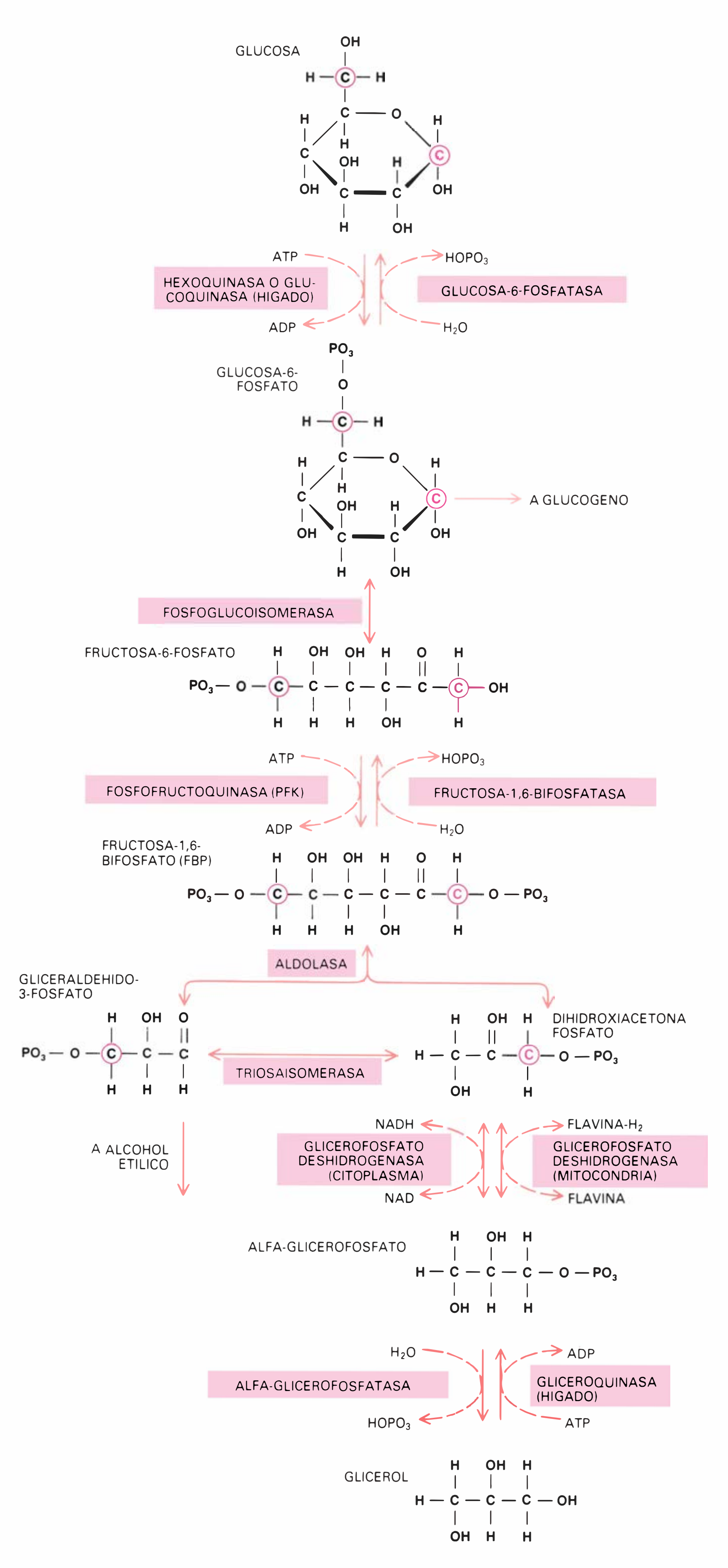
Y venía la cuestión inmediata. ¿Se provoca el efecto Pasteur por variaciones en la velocidad de actuación de ciertos enzimas? Una posibilidad en particular parecía digna de examen. En la vía del metabolismo glicolítico existe una reacción que transforma la fructosa-6-fosfato en fructosa-1,6-bifosfato, o FBP, bajo la dirección del enzima fosfofructoquinasa (PFK). Se sabe que el enzima es alostérico: la velocidad a la que cataliza la reacción no depende sólo de la concentración de sustrato (la fructosa-6-fosfato sobre la que actúa) sino también, por lo menos en el tubo de ensayo, de la concentración de unas diez pequeñas moléculas diferentes, que por dicho motivo se denominan efectores. Fundados en parte en esa abundancia de posibles mecanismos de control se suponía, desde tiempo atrás, que la PFK estaba controlada en las células vivas. Pero ningún experimento había demostrado cuáles eran los efectores de la célula que realmente controlaban el enzima.

Den Hollander, Ugurbil y Brown utilizaron los espectros de fósforo-31 para investigar qué cambios originaba la presencia de oxígeno en las células de levadura. Sus mediciones demostraron una variación importante en el pico del P_i, cuya intensidad disminuía hasta unas cuatro veces su valor y se desplazaba en su posición, manifestando que el *p*H intracelular había aumentado de 7,04 a 7,45. Al propio tiempo, el pico

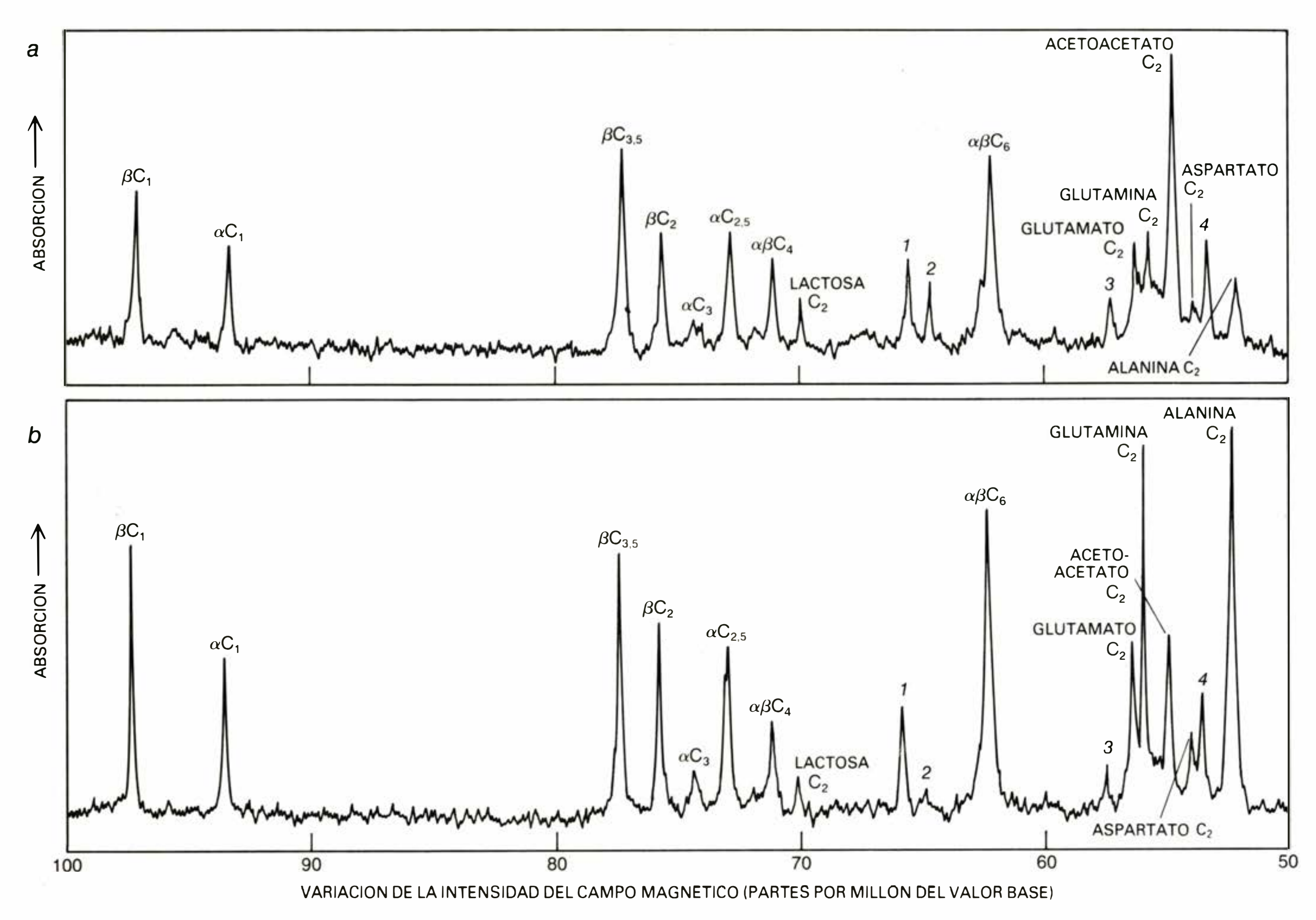
de la fructosa-6-fosfato aumentaba varias veces, mientras que los picos correspondientes al ATP y ADP variaban ligeramente. Determinaciones recientes de la actividad de la PFK realizadas en tubo de ensayo por den Hollander y David Reibstein demuestran que, bajo tales condiciones, remite la actividad del enzima.

Importa resaltar, sin embargo, que la concentración intracelular de la FBP (el producto de la reacción catalizada por la PFK) se mantuvo bastante constante en los espectros de Hollander, a pesar incluso de la fuerte reducción de la tasa de formación de la FBP. Debería haber disminuido, en el mismo grado, la tasa de consumo de FBP. Gracias a un método basado en la naturaleza de las reacciones glucolíticas se deduce el flujo de FBP (y el flujo de materia molecular a través de dicha fase de la glicolisis) a partir de los espectros de RMN de carbono-13. En los primeros pasos de la glicolisis, el marcador de carbono-13 introducido por den Hollander en la posición C_1 de la glucosa pasa directamente a la posición C_1 de la FBP. A continuación, se produce una reacción en la que la FBP se divide en dos compuestos de tres átomos de carbono; cada uno de ellos participa en ulteriores reacciones de la vía metabólica. O también puede suceder que cada uno de los compuestos de tres carbonos se transforme en el otro y ambos se combinen para formar FBP de nuevo. Estas reacciones a la inversa "deslocalizan", o mezclan, el carbono-13; y así, éste aparece en la posición C_6 de la FBP reconstituida.

En general, pues, la competición entre el flujo que desciende por la vía glicolítica y el sentido inverso del mismo, en el que reaparece FBP, determina la distribución de los átomos marcados entre las posiciones C_1 y C_6 de la FBP. Si existe poca tendencia al avance por la vía metabólica, quedará tiempo sufi-



5. POR VIA GLICOLITICA se entiende la secuencia de reacciones químicas a través de las cuales las células metabolizan la glucosa. Para seguir esa cadena de sucesos en los espectros de RMN, se aporta glucosa a las células marcadas con carbono-13. En este caso la glucosa se ha marcado en la posición C_1 (*círculo y símbolo de color*). Posteriormente, el marcador se ha desplazado, en el curso de la glicolisis, hasta la posición C_1 de la FBP y de ahí ha pasado al fosfato de dihidroxiacetona, un compuesto de tres carbonos. Si se producen las reacciones inversas, una parte sustancial del marcador se incorporará en el gliceraldehído-3-fosfato (*círculo de color que encierra el símbolo negro*); tenemos así la posición C_6 en la FBP. Finalmente se desplaza la posición C_6 en la glucosa. El "mezclado" del marcador en la FBP, según las mediciones de la intensidad de los picos de C-13, constituye un índice de la inversión de la glicolisis en la célula.



6. EFECTO DE LA HORMONA TIROIDEA sobre las células del hígado de la rata: incrementa la tasa de síntesis de glucosa por un proceso que, esencialmente, es el inverso de la glicolisis. Un espectro de RMN (*a*) presenta picos debidos al carbono-13 en sustancias que las células hepáticas de la rata han sintetizado tras ingerir alanina (un aminoácido) marcada con carbono-13 en la posición C_3. Para el otro espectro (*b*) se trató una rata con hormona tiroidea y a continuación se le ofreció alanina. Los picos correspondientes al carbono-13 en diversas posiciones en dos formas de la glucosa (α y β) son, a todas luces, mayores. Otros picos presentan también diferencias. Desconocemos todavía qué sustancias provocan los picos 1, 2, 3 y 4 de cada espectro.

ciente para reconstituir FBP. En cuyo caso, la intensidad del pico de RMN derivado del carbono-13 en posición C_6 de la FBP debería ser igual, en intensidad, al pico derivado de la posición C_1. Pero si el metabolismo es rápido, quedará poco tiempo para el mezclado del marcador; no se detectará entonces el pico de C_6. Los espectros de den Hollander demuestran que la oxigenación de las células de levadura favorece el proceso de mezclado. Y él calculó, a partir de ese efecto, que el flujo a través del FBP se había reducido en varias veces. De donde se seguía que el flujo en cuestión se regulaba en un punto situado en una posición más avanzada de la vía metabólica.

Merece la pena estudiar la inversión de flujo a lo largo de la vía glicolítica, pues son muchas las células que invierten el flujo para sintetizar glucosa si carecen de ella. La FBP es un producto intermedio en ambos sentidos de la dirección del flujo. El enzima que lo produce en la vía que se aleja de la glucosa es la PFK; el enzima que cataliza la reacción opuesta, que lleva a la FBP un paso más cerca de la glucosa, es la fructosa-1,6-bifosfatasa. Téngase en cuenta que la formación de FBP por la PFK requiere transferir fosfato inorgánico del ATP a la fructosa-6-fosfato. Ahora bien, en la reacción inversa, el fosfato se desprende. Si ocurren ambas reacciones, el resultado neto será la pérdida de una molécula de ATP en lo que se denomina un ciclo fútil. Se conocen muchos ciclos de éstos.

¿Qué es lo que controla un ciclo fútil? Saber que la FBP, al igual que muchos otros azúcares, existía en dos formas (alfa y beta) que sólo diferían en el intercambio de dos átomos de carbono, facilitó una primera hipótesis. La mezcla de estas formas sólo precisa aproximadamente un segundo para alcanzar una distribución de equilibrio en la que el 15 por ciento de las moléculas aparecen en la forma alfa y el 85 por ciento en la beta. Los estudios llevados a cabo en tubo de ensayo demuestran que la fructosa-1,6-bifosfatasa, que impulsa a la FBP hacia la glucosa, actúa preferentemente sobre la forma alfa. La aldolasa, enzima que lleva a la FBP un paso más allá a partir de la glucosa, actúa, preferentemente, sobre la forma beta.

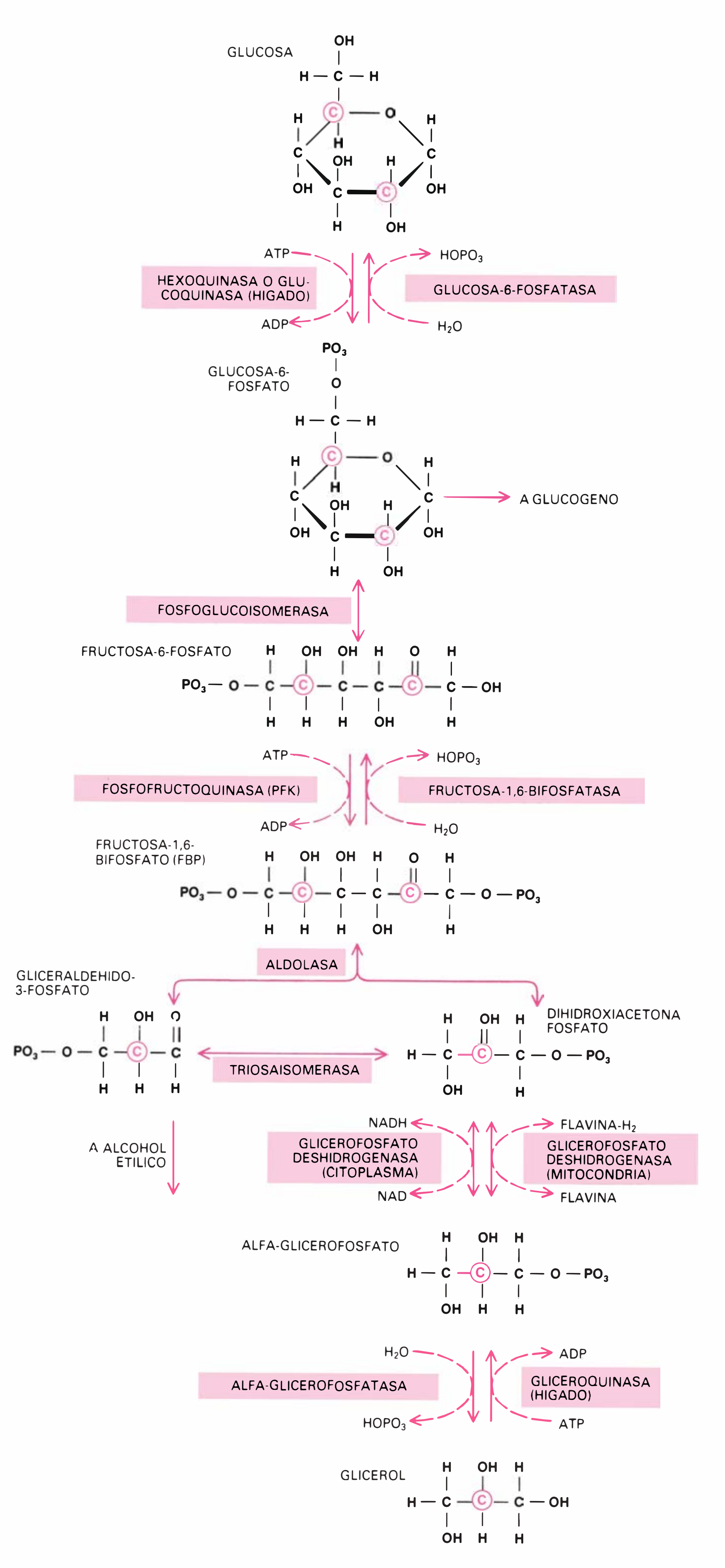
Se había sugerido que la célula viva controlaba el sentido de flujo por el ciclo fútil regulando la distribución de las formas de la FBP. Pero la hipótesis no pudo comprobarse con extracción de la FBP de la célula y análisis de su distribución. La extracción hubiese requerido un tiempo mayor del segundo necesario para el restablecimiento del equilibrio. La espectroscopía de RMN de bacterias intactas de *E. coli* facilitaba otro tipo de prueba. Den Hollander. Ugurbil y Brown midieron los picos de carbono-13 de las formas alfa y beta de la FBP en el interior de las células mientras metabolizaban glucosa. Los resultados demostraron que la FBP se encontraba en equilibrio. Por tanto, la dirección de flujo no estaba controlada por el desequilibrio.

Cuando las células de un mamífero consumen glucosa, los productos finales de la glicolisis (ácido láctico) son transportados por la sangre al hígado junto con los productos finales del me-

tabolismo de las grasas (glicerol). El hígado toma estos desechos y los convierte de nuevo en glucosa. Ello explica por qué el hígado ha sido objeto de amplia investigación en relación con el proceso de inversión de la glicolisis: la ruta gluconeogénica. Paradójicamente, los resultados son múltiples, demasiados. El estudio de hígados enteros y aislados, cortes del tejido y células hepáticas revela muchas maneras posibles de controlar la vía metabólica, pero nada revela de la regulación real en el hígado de un animal vivo. Vale la pena resumir los posibles tipos de control si queremos hacernos una idea del progreso realizado por la espectroscopía de RMN en lo relativo al establecimiento de los controles reales, más allá por tanto de los meros plausibles.

En primer lugar, la tasa o velocidad de producción de glucosa en el hígado puede quedar condicionada por las concentraciones de los sustratos de la ruta gluconeogénica. Un mayor nivel de ácido láctico origina una mayor tasa de producción de glucosa. En segundo lugar, la producción de azúcar puede depender de la ingesta. Los animales privados de glucosa presentan mayores niveles de los enzimas que la sintetizan. En tercer lugar, en la actividad de estos enzimas sintetizadores puede intervenir la magnitud o grado con que los grupos fosfato están ligados a esas proteínas. Esta fosforilación, que suele ser controlada por hormonas de acción rápida tales como el glucagón, pone en funcionamiento varios enzimas celulares. En cuarto lugar, algunos enzimas que sintetizan glucosa están regulados por efectores. En quinto lugar, la concentración de los enzimas puede depender de hormonas de acción lenta, entre ellas las sintetizadas por la glándula tiroides.

Cuando trabajaba en los laboratorios Bell, Sheila Cohen recurrió a la espectroscopía de RMN de compuestos marcados por carbono-13 para seguir la vía gluconeogénica en el hígado sin manipular de la rata. Demostró la síntesis de glucosa a partir de glicerol, una vía que



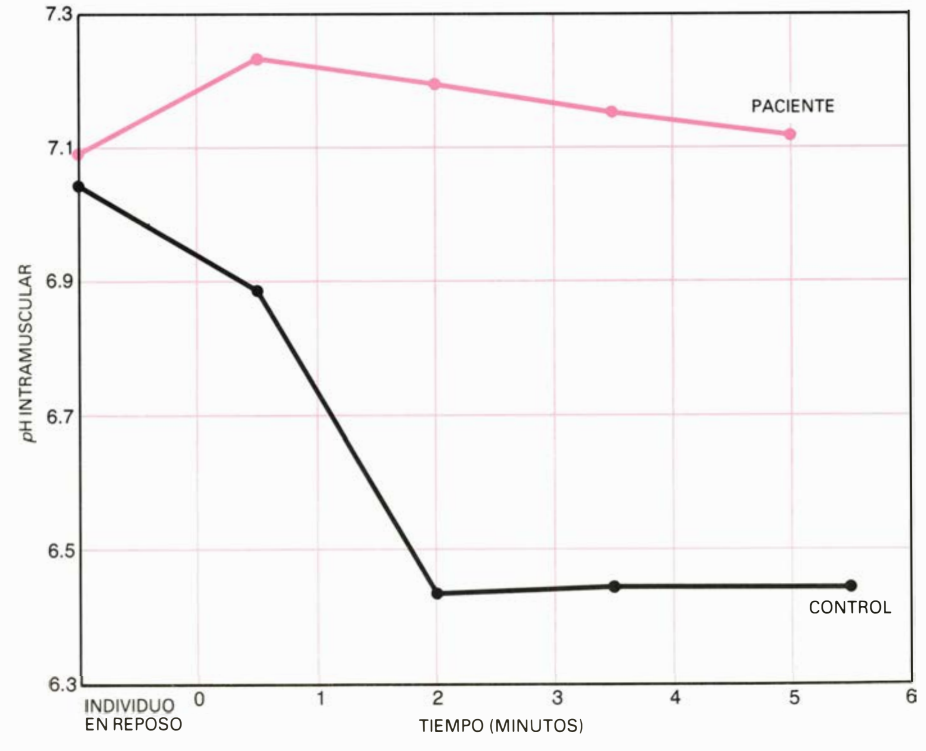
7. MARCAJE DEL GLICEROL (un producto final del metabolismo de la glucosa) para recorrer la vía gluconeogénica: secuencia de reacciones que invierten el proceso de glicolisis. Cuando se marca la posición del carbono medio del glicerol con carbono-13 (*color*), el marcador acaba distribuyéndose entre las posiciones C_2 y C_5 de la glucosa. Una pequeña cantidad de dicho marcador (no indicada) termina en posición C_1 de la glucosa, porque atraviesa una serie alternativa de reacciones conocidas por vía de la pentosa-fosfato. Los estudios de RMN de la gluconeogénesis demuestran que la hormona tiroidea aumenta la producción de glucosa en las ratas hipertiroideas al avivar la actividad del enzima mitocondrial glicerofosfato deshidrogenasa.

consta de seis reacciones. Entre las ratas normales y otras sometidas a hipertiroidismo por tratamiento con dosis altas de una hormona tiroidea, aparecieron algunas diferencias. En las ratas hipertiroideas, la tasa de producción de glucosa mostró un incremento del doble y la concentración de alfa-glicerolfosfato, el compuesto inmediatamente situado después del glicerol en la vía metabólica, presentó una disminución de dos veces y media.

Dos enzimas distintos, con el nombre común de glicerofosfato deshidrogenasa, compiten por un mismo sustrato: el alfa-glicerolfosfato. Un enzima se encuentra en las mitocondrias, orgánulos intracelulares del citoplasma, y el otro disperso por la matriz citoplasmática. Cohen calculó que, bajo la influencia de la hormona, el enzima mitocondrial cuadriplicaba la cantidad de sustrato a expensas del enzima citoplasmático. Esta observación concuerda con los niveles y actividades de enzimas medidos en extractos de células hepáticas.

También se registraron algunos resultados inesperados. Los espectros de RMN obtenidos por Cohen mostraron que la hormona tiroidea producía un importante incremento del flujo a través de un ciclo fútil en la vía gluconeogénica. La base de estos cambios quizá resida en la modificación de las concentraciones de los enzimas que, con el tiempo, provoca la hormona.

Un reciente experimento realizado en mi laboratorio por investigadores del Oxford Research Systems y de Yale, a instancias de Jeffrey R. Alger, nos señala por dónde vendrá el futuro de la espectroscopía de RMN. Dieron a una rata glucosa marcada con carbono-13. A través de los espectros de RMN comprobaron la desaparición de la glucosa en el estómago del animal vivo. En cuestión de unas horas aumentó el nivel de glucógeno en el hígado del animal; allí se estaba almacenando la glucosa en forma de glucógeno. Finalmente, el pico del glucógeno desapareció al consumirse el glucógeno marcado. Los espectros de RMN les habían permitido a los investigadores seguir el metabolismo por todo el cuerpo del animal. La RMN tiene la llave de la técnica que nos conducirá a la comprobación minuciosa de cómo las hormonas, la dieta y las enfermedades afectan a los procesos químicos de la vida. Considerando el breve tiempo en que los espectros de RMN han podido contribuir al estudio del metabolismo, es razonable prever que, dentro pocos años, la técnica revolucionará nuestros conocimientos sobre los mecanismos bioquímicos de los animales.



8. DIAGNOSTICO DE ENFERMEDADES mediante la espectroscopía de RMN. Lo han descrito un grupo de investigadores dirigidos por George K. Radda y Brian D. Ross, de la Universidad de Oxford. Este caso, el síndrome de McArdle, se caracteriza por la fatiga al menor esfuerzo y resulta del bloqueo de la fosforilasa, un enzima que participa en la formación de glucosa en el tejido muscular. Los metabolitos de la glucosa reducen el *p*H de las células. En los espectros de RMN, la enfermedad se revela por una ausencia de variación de *p*H, como nos demuestra la posición inalterada de los picos de fosfato inorgánico en los espectros del brazo del paciente durante el ejercicio. Los individuos sometidos a estas determinaciones llevaban atado un manguito para evitar que llegase glucosa fresca de la sangre arterial al músculo.

Física de los tubos de órgano

El majestuoso sonido de un órgano de tubos se obtiene por la interacción, cuidadosamente preparada, entre una corriente de aire que sopla por la boca de cada tubo y la columna de aire que resuena en su interior

Neville H. Fletcher y Suszanne Thwaites

Ningún instrumento musical iguala al órgano de tubos en potencia, timbre, amplitud dinámica y majestuosidad sonora. Como muchos otros instrumentos musicales, el órgano ha alcanzado tan elevado grado de perfeccionamiento gracias a una lenta acumulación de conocimientos empíricos por generaciones de artesanos. A fines del siglo XVII, el órgano había definido las líneas básicas de su forma actual. Dos famosos físicos del siglo XIX, Hermann von Helmholtz y Lord Rayleigh, llegaron a conclusiones opuestas sobre el mecanismo a través del cual generan sonidos los tubos de órgano, pero carecían de medios técnicos para resolver el dilema. La aplicación de osciloscopios y otros aparatos modernos ha permitido adquirir un conocimiento detallado de dicho mecanismo, resultando que los análisis de Helmholtz y Rayleigh son válidos ambos, cada uno dentro de un margen de presión del aire que se insufla al tubo. El estado actual de nuestros conocimientos, que se describe a continuación, discrepa de muchas ideas sobre el mecanismo de los tubos de órgano que todavía se recogen en ciertos libros de texto.

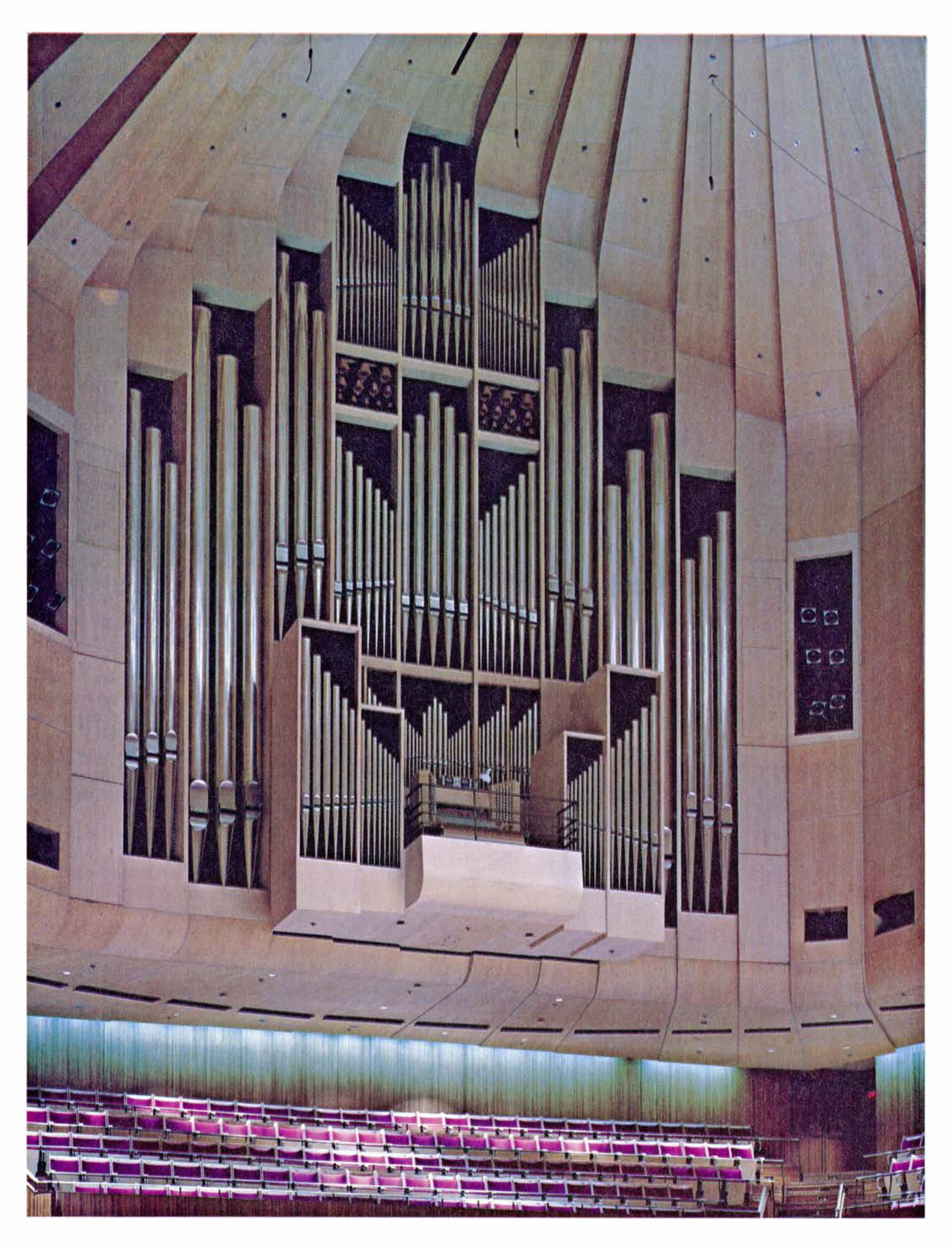
Los tubos de caña, o de otras plantas de tronco hueco, constituyeron los primeros instrumentos musicales que sepamos. Se construyeron para emitir sonido soplando a través de un extremo del tubo, insuflando de forma que vibraran los labios o apretando el extremo para que las paredes del tubo entraran en vibración. Las versiones modernas de estos tres instrumentos de viento primitivos son las flautas, las trompetas y los clarinetes, todos ellos desarrollados de forma que el intérprete produzca muchas notas dentro de una amplia gama de frecuencias acústicas.

Paralelo desarrollo han seguido los instrumentos de tubos en los que cada tubo da una sola nota. El más sencillo, la flauta de Pan, posee unos 20 tubos de diferentes longitudes, que se cierran en un extremo y se excitan soplando a ras del extremo abierto. El instrumento más complejo es el órgano de tubos, que puede alcanzar las 10.000 unidades, controladas por el intérprete a través de un complejo sistema mecánico. El órgano de tubos tiene una larga historia. En cerámicas que datan del siglo II a. de C. aparecen músicos alejandrinos tocando una serie de tubos excitados a través de un fuelle. En el siglo X, el órgano empezó a entrar en las iglesias cristianas y en Europa circulaban tratados escritos por monjes sobre la construcción de órganos. El gran órgano fabricado en el siglo X para la catedral de Winchester, Inglaterra, debió poseer 400 tubos metálicos, 26 fuelles y dos teclados con un total de 40 teclas, cada una de las cuales controlaba 10 tubos. Los siglos posteriores asistieron a importantes avances mecánicos y musicales en la construcción de órganos; ya en 1429 se fabricó uno de 2500 tubos para la catedral de Amiens. A fines del siglo XVII, los órganos alcanzaron en Alemania su forma moderna.

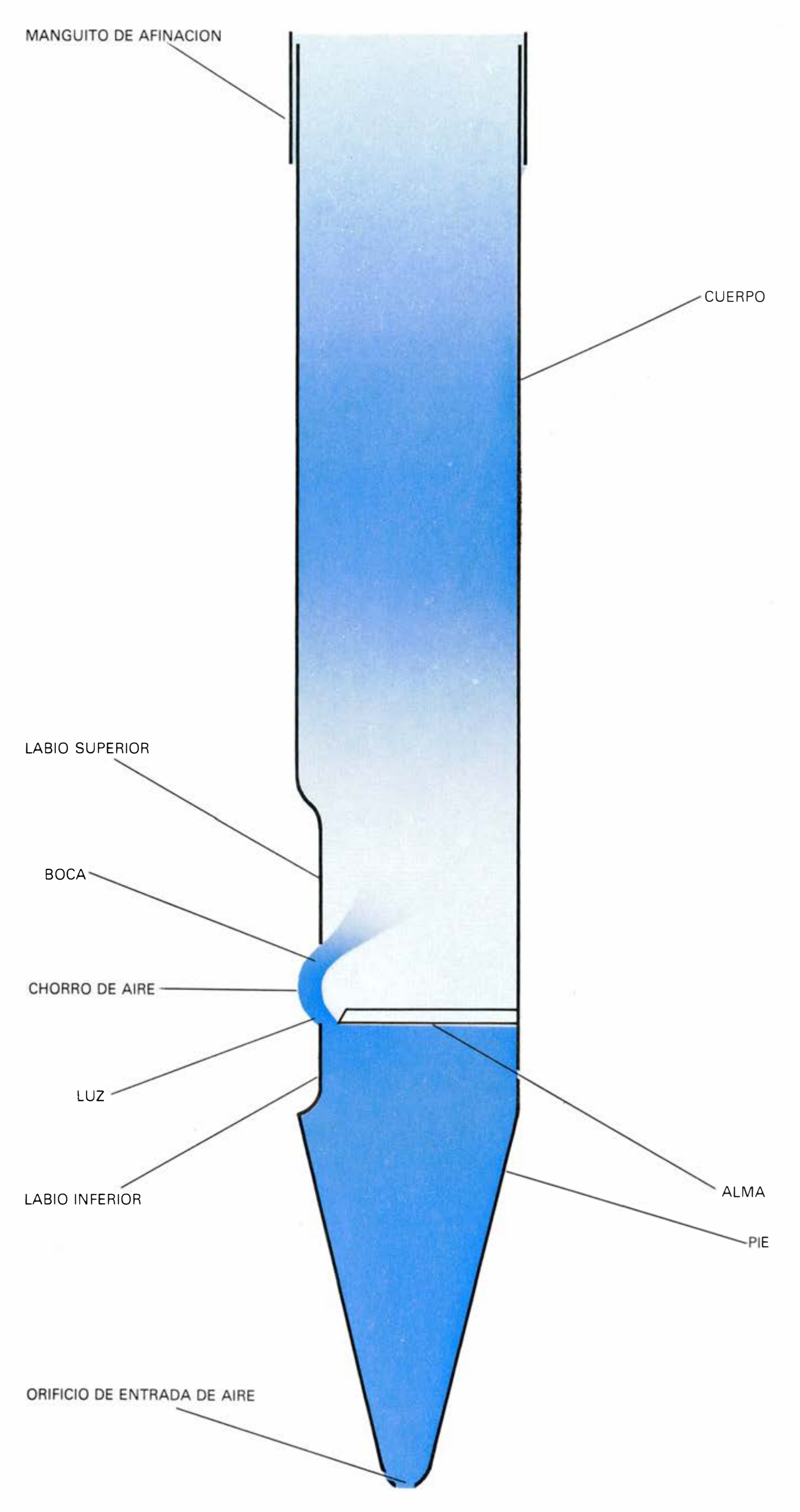
La terminología utilizada para describir los tubos de órgano refleja su origen en los tubos soplados por la boca. Los tubos de órgano están abiertos por arriba; en la parte inferior tienen forma cónica, con una "boca" (una hendidura) horizontal en la sección plana situada encima de la región cónica. Dentro del tubo hay un *alma* (placa horizontal) que deja una estrecha luz junto al labio inferior de la boca [*véase la figura 2*]. El aire que excita el tubo procede de grandes fuelles, y alcanza el pie cónico del tubo a una presión comprendida entre los 500 y los 1000 pascal (de cinco a 10 centímetros medidos en un manómetro de columna de agua). Cuando por la acción del registro y de la tecla correspondientes entra aire en el tubo, circula en sentido ascendente y forma un flujo laminar en su transcurso, por la luz. La corriente de aire pasa a ras de la boca y llega al labio superior, donde interacciona con el propio labio superior y con la columna de aire contenido en el tubo, manteniendo la oscilación estacionaria que genera la "voz" del tubo. ¿Cómo tiene lugar la transición abrupta del silencio a una onda estacionaria? Es esa una cuestión compleja y fascinante a la vez, de la que aquí no podemos ocuparnos. Nos limitaremos a los procesos que controlan el sonido estacionario de los tubos de órgano y que les dan el timbre característico.

A primera vista, se diría que el comportamiento de la corriente de aire que inicia y mantiene el sonido del órgano pertenece al dominio de la dinámica de fluidos. Ahora bien, si ya resulta difícil describir una corriente uniforme de tipo laminar, desde el punto de vista teórico, la corriente turbulenta que penetra en el tubo de órgano supone un problema casi inabordable. Afortunadamente, la complejidad aportada por la turbulencia simplifica el comportamiento de la corriente. Si el flujo fuera laminar, la corriente interaccionaría, por viscosidad, con lo que la rodea. En la corriente real, la turbulencia sustituye a la viscosidad en el mecanismo de interacción, y lo hace en una magnitud directamente proporcional al ancho de la corriente. Los organeros se aseguran de que los chorros de los tubos sean muy turbulentos entallando pequeñas muescas a lo largo del canto del alma. Por paradójico que parezca, una corriente turbulenta es estable y reproducible, mientras que una corriente laminar no lo es.

Una corriente muy turbulenta se mezcla de forma gradual con el aire de su entorno, ampliándose y reduciendo su velocidad según un modelo muy simple. Si representamos la velocidad de la corriente en función de la distancia de su plano central, la curva resultante tiene forma de campana: la velocidad máxima queda en el centro. La anchura de



1. ORGANO DE LA SALA DE CONCIERTOS de la Sydney Opera House, terminado en 1979, uno de los mayores y más avanzados del mundo. Diseñado y construido por Ronald Sharp, tiene unos 10.500 tubos controlados por acción mecánica a través de 5 teclados y un pedalero. La acción mecánica que regula el paso del aire hacia los tubos está duplicada por un sistema eléctrico controlado por microprocesadores. El órgano puede así sonar a partir de una cinta magnética donde se haya grabado previamente, de forma digital, la interpretación original. (Fotografía tomada por Pieter Stroethoff.)



2. TUBO DE ORGANO, excitado por el aire insuflado en el extremo inferior. El aire se transforma en un chorro mediante la hendidura (luz) que queda entre el labio inferior y el alma: una placa transversal al tubo. Cuando el aire supera la boca del tubo, interacciona con la columna de aire contenida en el tubo a nivel del labio superior, y entra y sale, alternativamente, del tubo. Las ondas que se propagan a lo largo de la corriente turbulenta mantienen una oscilación uniforme en la columna de aire, haciendo que el tubo suene. La configuración de la onda estacionaria de presión en el tubo se ha representado por el sombreado de color. El extremo superior del tubo está rodeado por un manguito ajustable, o está cerrado con una tapa corredera. Ambos permiten cierto ajuste de la longitud de la columna de aire para su afinación.

la corriente aumenta linealmente con la distancia a la luz. Puesto que debe conservarse el momento del flujo, la velocidad disminuye con la raíz cuadrada de la distancia a la luz. Esta exposición, que no carece de soporte teórico, está de acuerdo con la experiencia (cuando se incluye una pequeña zona de transición cerca de la luz).

En un tubo de órgano ya excitado y emitiendo sonido, la corriente de aire sale de la luz y penetra en el intenso campo sonoro de la boca del tubo. El movimiento de aire asociado con el sonido se dirige a la boca y, por tanto, sale perpendicularmente al plano de la corriente. Hace medio siglo, Burniston Brown, del University College de Londres, tomó unas magníficas fotografías de corrientes laminares cargadas de humo que penetraban en el campo sonoro; observó que constituían ondas sinuosas que iban creciendo a medida que viajaban con la corriente, hasta que se disolvía la corriente formando una doble serie de remolinos que giraban en sentidos opuestos. La aplicación algo ingenua de estas observaciones y otras similares dio pie a las confusas explicaciones sobre la física de los tubos de órgano que todavía se propagan a través de libros de texto.

Una forma más útil de estudiar el comportamiento de corrientes reales en un campo sonoro consiste en retirar el tubo de órgano y generar el campo sonoro por medio de un altavoz. A esos ensayos, realizados por John W. Coltman, de la Westinghouse Electric Corporation, y por nosotros, en la Universidad de Nueva Inglaterra, Australia, debe bastante el avance teórico de la física de los tubos de órgano. Rayleigh había establecido un minucioso modelo matemático, casi exhaustivo, del comportamiento de las corrientes laminares de fluidos no viscosos. Merced a la afortunada circunstancia de que la turbulencia simplifica el comportamiento del flujo, en lugar de complicarlo, el modelo de Rayleigh puede utilizarse, con ligeras modificaciones, para describir el comportamiento de los flujos reales generados y analizados experimentalmente por Coltman y nosotros.

Si se pudiera prescindir de la acción de la luz en el tubo de órgano, cabría esperar que la corriente, siendo simplemente una capa de aire en movimiento, se moviera de forma oscilante, debido a las vibraciones acústicas, conjuntamente con todo el aire contenido en la boca del tubo. Sin embargo, a medida que el chorro abandona la

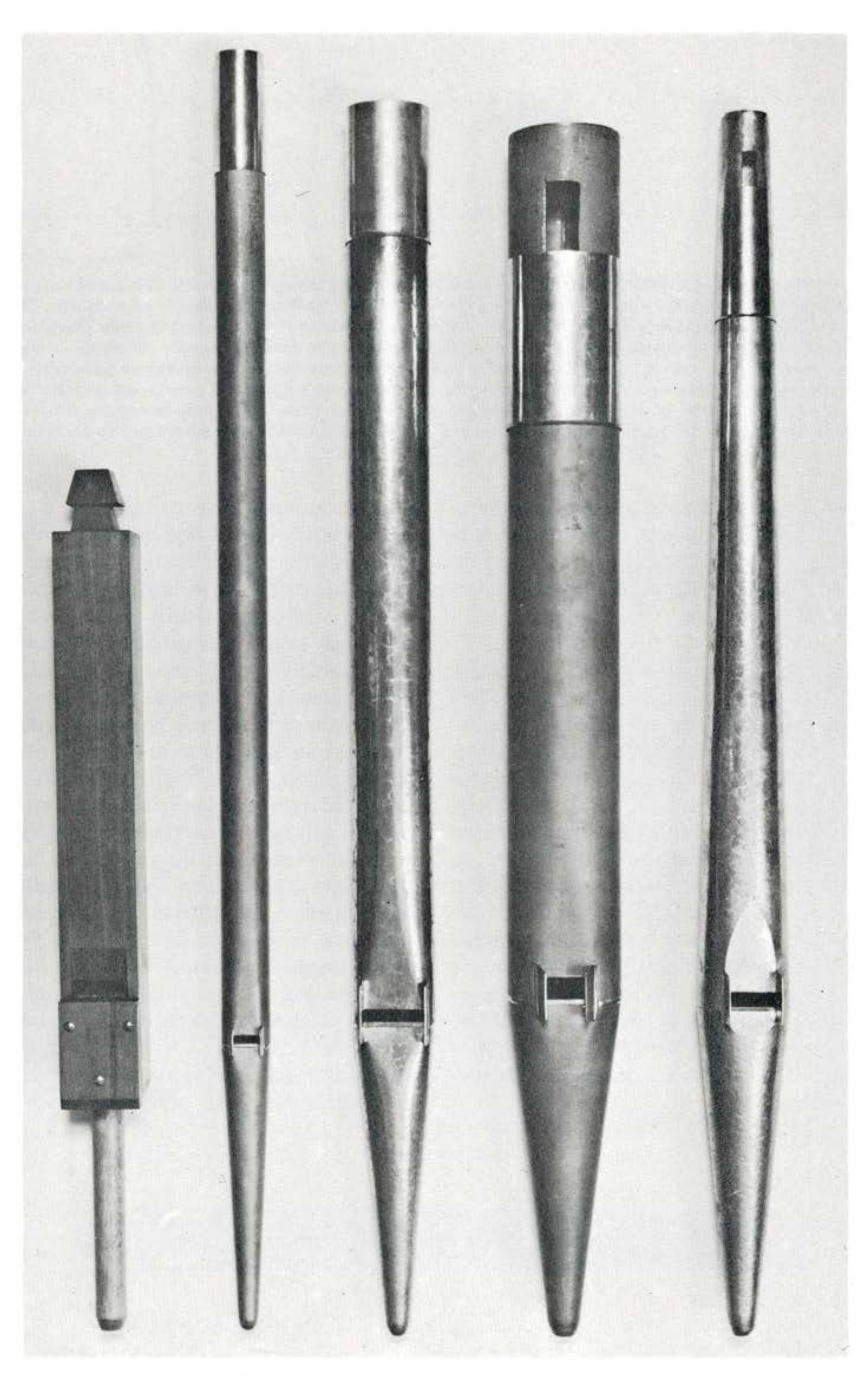
luz, ésta lo mantiene en reposo. Lo que equivale a superponer al movimiento oscilante del campo sonoro un desplazamiento compensador localizado en la luz. El desplazamiento localizado, que se acopla al campo sonoro en frecuencia y amplitud con el fin de mantener un desplazamiento cero en la luz, se transmite con el aire en movimiento de la corriente, imprimiéndole un movimiento ondulante.

Como mostró Rayleigh en sus corrientes para un caso límite, y tal como hemos verificado con detalle en corrientes turbulentas divergentes, el movimiento de las ondas se propaga a lo largo de la corriente a una velocidad que es algo inferior a la mitad de la velocidad del aire en el plano central de la corriente. Además, la onda crece en amplitud casi exponencialmente, conforme se propaga por la corriente. En un caso típico, la amplitud de la onda se dobla al recorrer un milímetro a lo largo de la corriente: los efectos de la onda dominan rápidamente el simple movimiento lateral oscilante impuesto por las vibraciones acústicas.

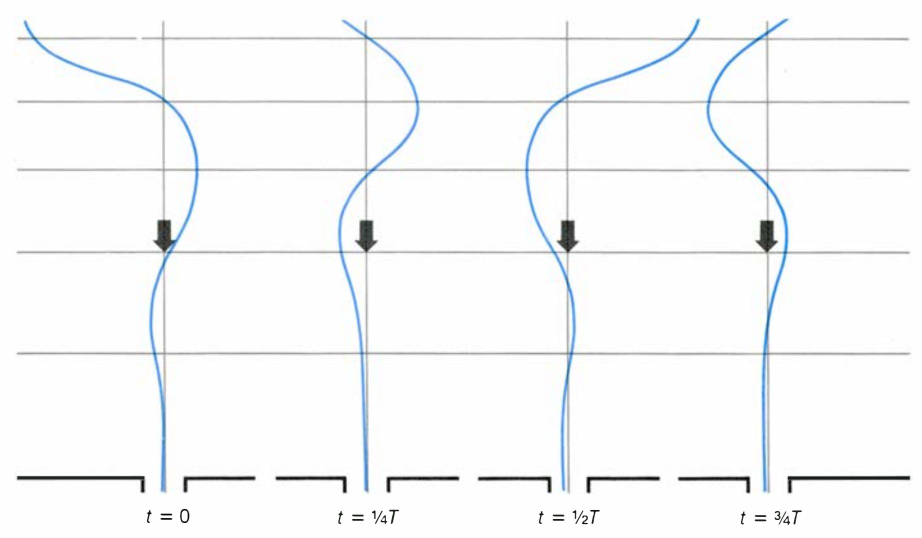
Observamos que la progresión del crecimiento de la onda es máxima cuando su longitud de onda a lo largo de la corriente viene a sextuplicar la sección de la corriente en dicho punto. Por el contrario, cuando la longitud de onda es inferior a la anchura de la corriente, la onda no crece, e incluso llega a extinguirse. Como la corriente reduce su velocidad y se ensancha a medida que se aleja de la luz, sólo las ondas largas, es decir, las de baja frecuencia, pueden propagarse con una gran amplitud por la corriente. Este hecho cobrará importancia al abordar el contenido armónico de los sonidos de los tubos de órgano.

Consideremos ahora los efectos del campo sonoro del tubo de órgano sobre la corriente. Las grandes ondas acústicas asociadas con el campo sonoro en la boca del tubo harán que el extremo de la corriente oscile en el labio superior de la boca, de forma que la corriente, alternativamente, penetre y salga del tubo. La situación recuerda lo que sucede cuando se da un impulso a un columpio que ya se halla en movimiento. La columna de aire del tubo ya está oscilando y, si las bocanadas de aire penetran en el tubo al compás de las oscilaciones, las propias bocanadas mantendrán las oscilaciones, compensando las diversas pérdidas de energía que se producen por radiación de sonido del tubo y por rozamiento con las paredes del mismo. Pero si las bocanadas no están en sintonía con las oscilaciones de la columna de aire, la corriente tenderá a amortiguar las oscilaciones y el sonido se extinguirá.

Las relaciones que unen a los movimientos acústicos del aire situado en la boca del tubo y el tiempo con que el pulso de aire llega al labio superior se determinan a partir del tiempo necesario para que una onda de la corriente viaje desde la luz hasta el labio superior. El organero llama corte a esta distancia. Con un corte amplio, o una baja presión de soplado –y, por ende, una



3. CINCO TUBOS DE DISTINTOS DISEÑOS producen una nota con el mismo tono pero con timbre distinto. El segundo tubo a partir de la izquierda es la dulciana, de sonoridad dulce, fina, que recuerda un instrumento de cuerda. El tercero es un diapasón abierto, que da un sonido brillante, vibrante, muy característico del órgano. El cuarto tubo produce el sonido de una flauta sombría. El quinto es una *Waldflöte* (flauta de bosque) de sonoridad suave. El tubo de madera de la izquierda está obturado con un tapón. Posee la misma frecuencia fundamental que los otros, pero sólo presenta armónicos impares: sobretonos con frecuencias que son múltiplos impares del fundamental. Los otros tubos difieren ligeramente en longitud, en virtud de las "correcciones finales" necesarias para que todos den el mismo tono.



4. FORMA DEL CHORRO DE AIRE, en "instantáneas" consecutivas tal como sale de la luz al campo acústico dinámico generado en la boca del tubo por la columna resonante de aire que éste contiene. El desplazamiento periódico del aire en la boca crea una onda sinuosa que se propaga con una velocidad igual a la mitad de la velocidad del aire en el plano central de la corriente de aire y crece de forma exponencial hasta que su amplitud excede el ancho de la corriente de aire. Las divisiones horizontales representan las distancias recorridas por la onda de la corriente en sucesivos cuartos del período de oscilación, *T*. Las líneas se acercan a medida que la corriente se frena. En un tubo de órgano, el labio superior se sitúa en el punto donde está la flecha; el aire sopla alternativamente dentro y fuera del tubo.

baja velocidad de la corriente–, el tiempo de recorrido será prolongado. A la inversa, si el corte es pequeño, o la presión de soplo es alta, el tiempo de recorrido será breve.

Para determinar cuál sea la relación de fase correcta entre la oscilación de la columna de aire del tubo y la penetración de los impulsos de la corriente dentro del labio superior es preciso conocer mejor el desarrollo de los impulsos sobre la columna de aire. Helmholtz atribuyó el factor dominante en esta relación al volumen de flujo proporcionado por la corriente. Si los impulsos del flujo de la corriente hubieran de ceder la máxima energía posible a la oscilación de la columna de aire, deberían penetrar en el tubo en aquellos instantes en que la presión acústica dentro del labio superior alcanzara un máximo.

Rayleigh tomó un punto de vista distinto. Puesto que la boca no está muy lejos del extremo abierto del tubo, pensó, puede establecerse una ligera presión acústica, justo dentro de la boca, que actúe contra el flujo de la corriente. Consideró que el chorro se detenía prácticamente al penetrar en el tubo, generando rápidamente la presión que pudiera ejercerse sobre el flujo del tubo. Por tanto, según Rayleigh, el máximo de energía se transferiría en el caso de que el flujo de la corriente penetrara en el tubo cuando el flujo acústico, no la presión, alcanzara un máximo. La diferencia entre estos dos máximos es un cuarto de período de la frecuencia de oscilación de la columna de aire del tubo. Siguiendo con el símil del columpio, la diferencia radica entre dar un empujón al columpio cuando está en el punto alto del arco y ha adquirido el máximo de su energía potencial (Helmholtz) y dar un empujón al columpio cuando pasa por el punto más bajo y se mueve a mayor velocidad (Rayleigh).

Transcurrieron 80 años sin que el problema recibiera solución, y sin apenas reclamar la debida atención. Pero acaba de encontrarse una explicación bastante satisfactoria gracias a los trabajos de Lothar Cremer y Hartmut Ising, del Instituto Heinrich Hertz de Investigaciones Vibratorias de Berlín, Samuel A. Elder, de la Academia Naval de los Estados Unidos, Coltman y nosotros mismos. Resumiendo, tanto Helmholtz como Rayleigh tenían su parte de razón. El equilibrio entre los dos mecanismos motrices depende de la presión de soplo y de la frecuencia del sonido; el mecanismo de Helmholtz domina a presiones bajas de soplado y a altas frecuencias, y el de Rayleigh domina en el caso de altas presiones y bajas frecuencias. Para un tubo de órgano normal, el mecanismo de Helmholtz suele ser el más importante.

Coltman ideó un método sencillo y eficaz para estudiar las propiedades de la corriente, que hemos ampliado y modificado en nuestro laboratorio. En esencia, se examina el comportamiento de la corriente en la boca de un tubo de órgano provisto de cuñas de fieltro absorbente o espuma en su extremo más distante; así bloqueado, el tubo no emite sonido. A continuación se dirige una onda sonora que baja por el tubo desde un altavoz situado por fuera del extremo distante. La onda se refleja en el extremo de la boca, insuflando o no la corriente de aire. En ambos casos, las ondas sonoras incidentes y reflejadas interactúan dentro del tubo formando ondas estacionarias. Midiendo con un pequeño micrófono de detección las variaciones de dichas ondas cuando interviene la corriente de aire insuflado, podemos determinar si el chorro añade o resta energía a la onda reflejada.

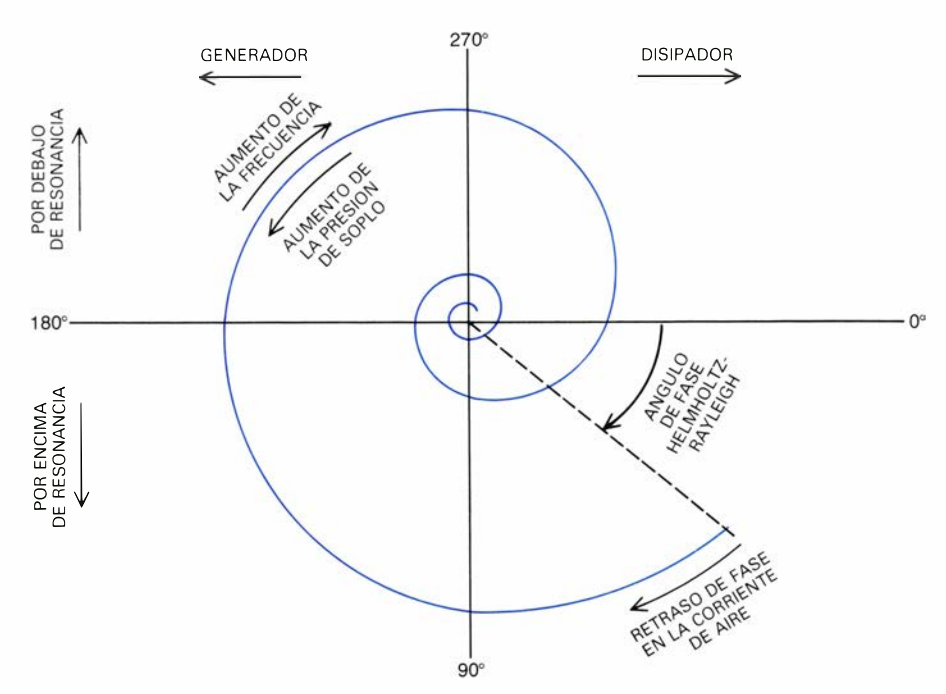
Lo que determinan en verdad nuestros experimentos es la "admitancia" acústica de la corriente de aire, que se define como el cociente entre el flujo que sale de la boca, producido por la presencia de la corriente, y la presión acústica justo dentro de la boca. La admitancia tiene una magnitud y un ángulo de fase, que pueden representarse en función de la frecuencia o de la presión de soplado. Cuando la frecuencia o la presión de soplado varían independientemente y se representan como es debido, la admitancia adopta la configuración de una espiral [*véase la figura 6*].

MICROFONO
ALTAVOZ
CUÑAS DE FIELTRO

5. PROPIEDADES DE GENERACION ACUSTICA del chorro de aire. Pueden medirse introduciendo cuñas de fieltro o espuma en el extremo abierto del tubo para evitar que suene, e introduciendo una onda sonora de pequeña amplitud procedente de un altavoz. La onda sonora se refleja en el extremo opuesto del tubo e interacciona en la boca con la corriente de aire. La interacción de la corriente con la onda estacionaria en el tubo se examina con un micrófono desplazable. Se establece así si la corriente de aire añade o resta energía a la onda reflejada en la base del tubo. Para que el tubo suene, la corriente de aire debe incrementar la energía. Las mediciones se realizan en términos de "admitancia acústica": la proporción de flujo acústico que sale de la boca y la presión acústica justo dentro de la boca. Un diagrama de la admitancia para diferentes combinaciones de presión de soplado y frecuencia da una espiral.

La distancia hasta el origen de la espiral representa la magnitud de la admitancia; la posición angular a lo largo de la espiral, el retraso en fase de una onda sinuosa que se superpone a la corriente debido a las oscilaciones acústicas que se dan en el tubo. Un retraso de una longitud de onda corresponde a 360 grados alrededor de la espiral. Dadas las particulares propiedades de las corrientes turbulentas, si se multiplica la admitancia por la raíz cuadrada de la presión de soplado, todas las mediciones efectuadas en un mismo tubo de órgano caen en la misma espiral.

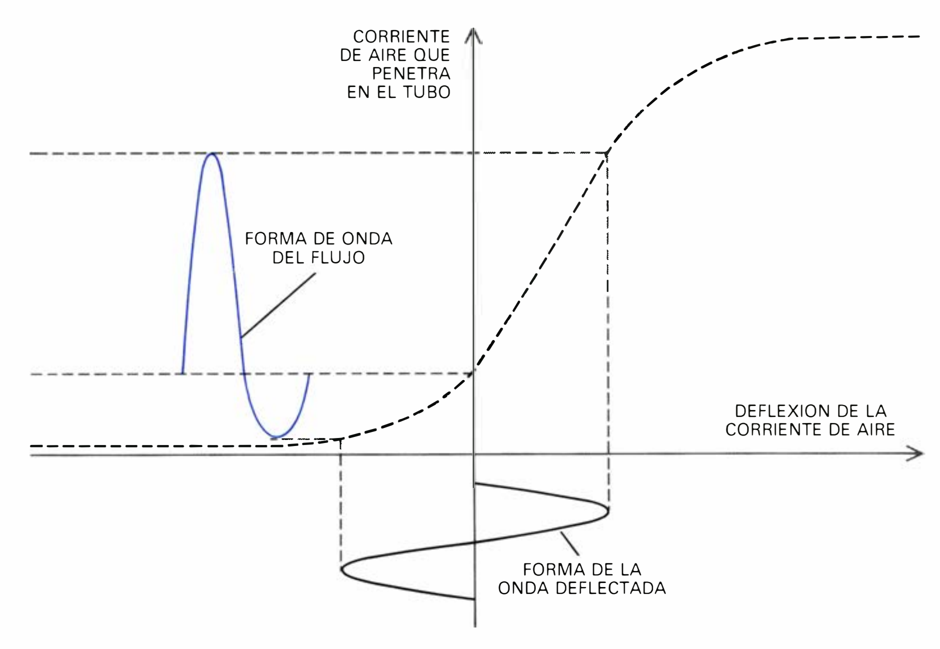
Si mantenemos constante la presión de soplado e incrementamos la frecuencia de la onda sonora de entrada, el punto que representa la admitancia se desplaza a lo largo de la espiral, hacia el origen, en el sentido de las agujas del reloj. Si mantenemos constante la frecuencia e incrementamos la presión de soplado, el punto avanza por la espiral en sentido contrario.



6. ADMITANCIA ACUSTICA DE LA CORRIENTE DE AIRE en función de la frecuencia o de la presión de soplado. Toma la forma de una espiral, donde la distancia al origen representa la magnitud de la admitancia y, la posición angular, la fase entre el flujo acústico a la salida de la boca del tubo y la presión justo dentro de la boca. Cuando la salida está en fase con la presión, la admitancia se sitúa en la mitad derecha de la espiral y se disipa la energía de la corriente de aire. Para que la corriente de aire actúe de generador acústico, la admitancia se situará en la mitad izquierda de la espiral, lo que requiere que el desplazamiento oscilante de la corriente de aire se desplace o se retrase en fase con respecto a la presión dentro de la boca del tubo. La onda reflejada de la corriente de aire es entonces mayor que la onda incidente. El ángulo de referencia a partir del cual se mide el retraso de fase depende de cuál de los mecanismos expuestos en el texto sea el dominante, el propuesto en el siglo pasado por Hermann von Helmholtz o el de Lord Rayleigh. Cuando la admitancia se sitúa en la mitad superior de la espiral, la corriente de aire reduce la frecuencia natural de resonancia del tubo; si cae en la mitad inferior de la espiral, la corriente incrementa la frecuencia de resonancia. Las regiones exteriores de la espiral se han reducido en tamaño para simplificar el esquema. (Los dibujos del artículo son de Andrew Christie.)

Cuando el punto que representa la admitancia se halla en la mitad derecha de la espiral, la corriente absorbe energía del flujo del tubo y, por tanto, se disipa energía. Cuando el punto se halla en la mitad izquierda, la corriente cede energía al flujo del tubo, lo que significa que la corriente actúa como un generador acústico. Cuando el punto está en la mitad superior de la espiral, la corriente reduce la frecuencia de la resonancia natural del tubo; cuando se halla en la mitad inferior, la corriente incrementa la frecuencia natural de resonancia. El ángulo de referencia a partir del cual se mide el retraso de fase depende del mecanismo de excitación que domine, si el de Helmholtz o el de Rayleigh; lo que, a su vez, depende de la presión de soplado y de la frecuencia. Sin embargo, nunca está situado demasiado lejos del cero, que corresponde a las tres del reloj, en el brazo derecho del eje horizontal.

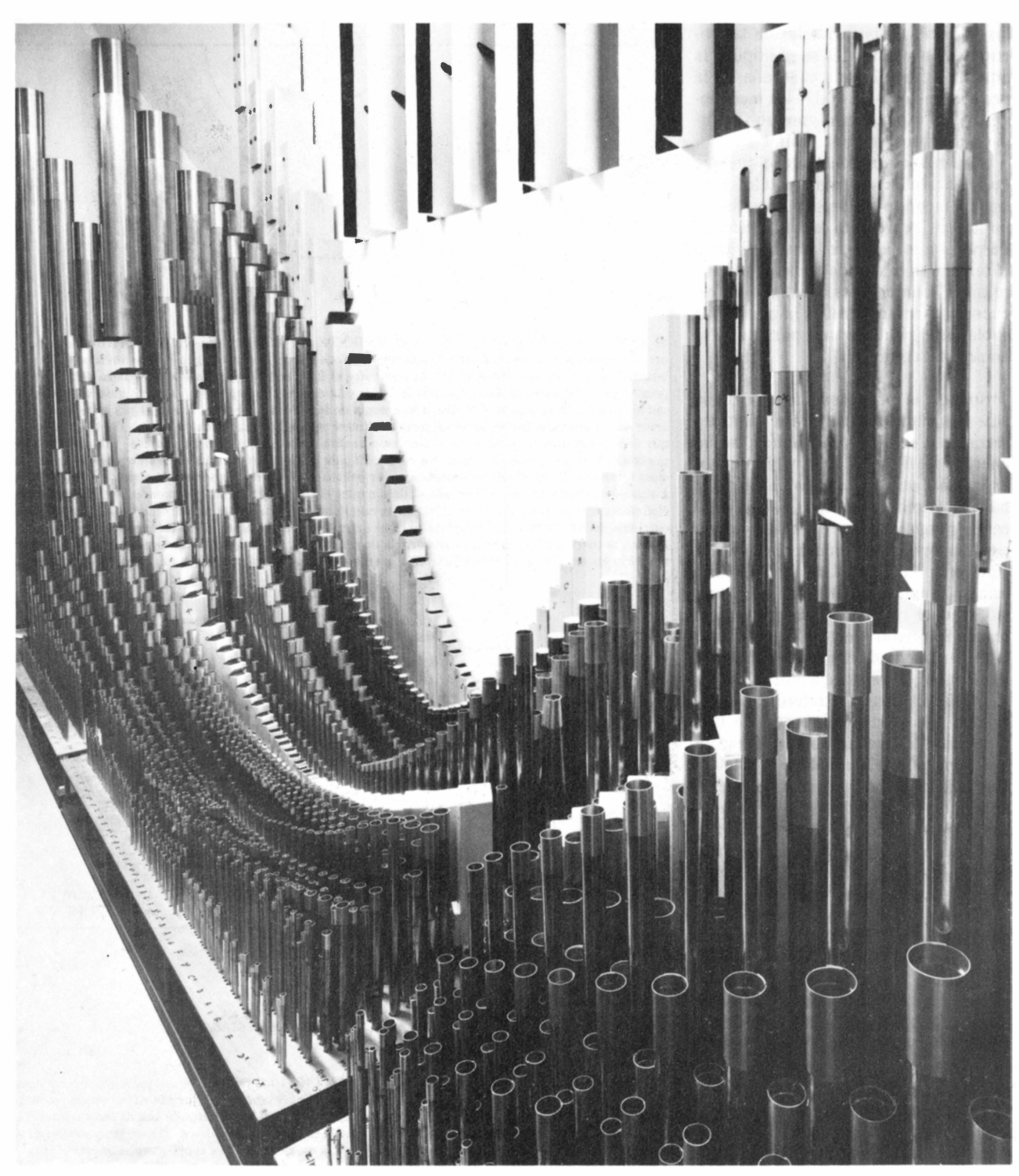
Puesto que un desplazamiento de 360 grados a lo largo de la espiral representa un retraso de fase de una longitud de onda de la sinusoide que se propaga por la corriente, para los retrasos de fase comprendidos entre algo menos de un cuarto de longitud de onda y cerca de tres cuartos de longitud de onda, un punto representativo de la espiral estará situado a la izquierda del eje central o en la región donde la corriente actúa como generador acústico. También hemos visto que, a una frecuencia constante, el retraso de fase es función de la presión de soplado, que controla tanto



7. CURVA QUE DA EL FLUJO QUE PENETRA EN UN TUBO (*curva a trazos*) para una determinada deflexión; es asimétrica en la posición cero porque el labio del tubo se ha ajustado de suerte que corte la corriente ligeramente fuera de su plano central. Cuando se desvía la corriente de aire de forma sinusoidal con una gran amplitud (*curva negra continua*), la corriente de aire que entra en el tubo (*curva de color*) se "satura" primero en un extremo de su gama, donde la corriente de aire sopla completamente fuera del labio del tubo. En el caso de una amplitud mayor, el flujo también se saturará en el extremo de su gama, donde la corriente de aire sopla completamente dentro del tubo. El desplazamiento del labio confiere a la onda del flujo una configuración asimétrica, con componentes de frecuencia en todos los múltiplos de la frecuencia de deflexión, que posibilitan la rica sonoridad de un tubo de órgano bien afinado.

la velocidad de la corriente como la velocidad con la que se propaga la onda en la propia corriente. Dado que la velocidad de la onda vale la mitad de la velocidad de la corriente y ésta es proporcional a la raíz cuadrada de la presión de soplado, la presión de soplado ha de variar mucho para modificar la fase de la onda de la corriente en media longitud de onda. En realidad existe un amplio margen, igual a unas nueve veces la presión, en el cual el tubo puede emitir su fundamental, siempre y cuando se satisfagan otras condiciones. En la práctica, el tubo pasará a un modo de frecuencia superior antes de llegar a este límite superior de presión.

Conviene destacar que la espiral puede tener más de una vuelta que se extienda bastante, lado izquierdo abajo, para vencer las pérdidas por disipación

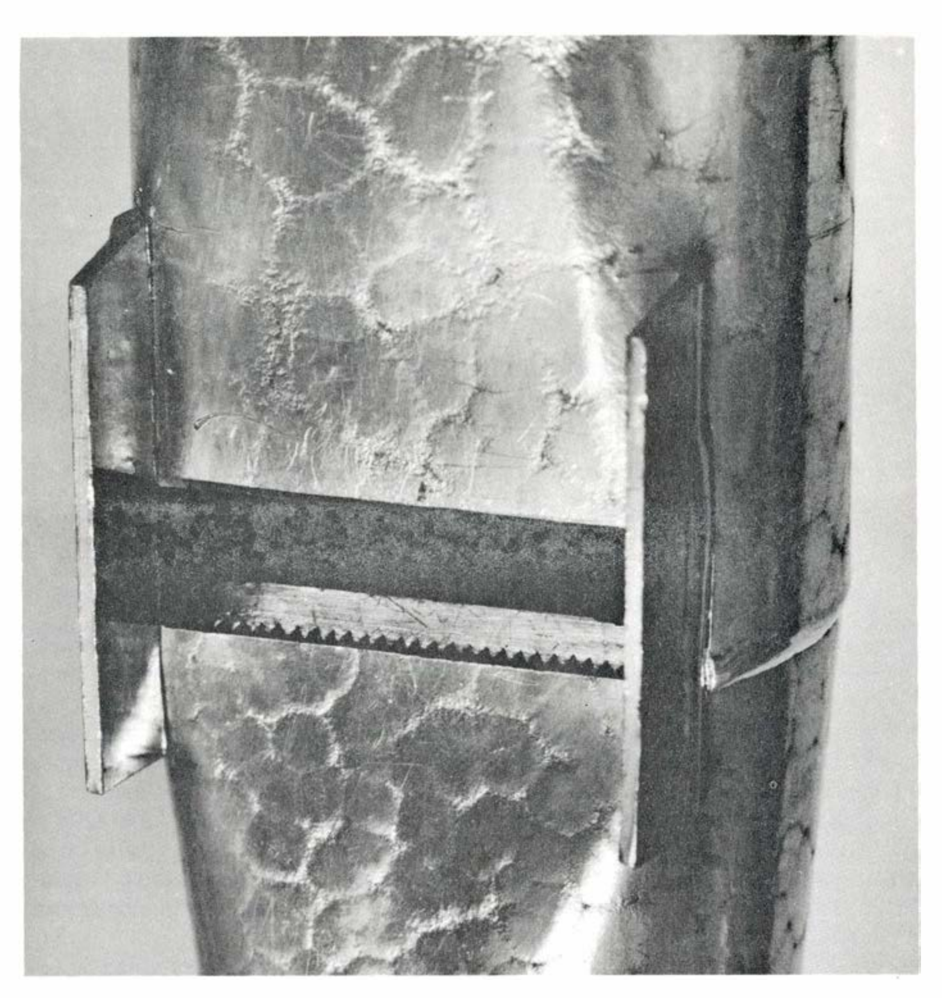


8. INTERIOR DEL ORGANO de la Sydney Opera House. Se observan algunas de sus 26 hileras de tubos, la mayoría de los cuales son metálicos, aunque los hay también de madera. La longitud de la parte sonora de cada tubo se duplica cada 12 tubos; el diámetro del tubo lo hace cada 16 tubos. Gracias a su larga experiencia, los organeros han llegado a definir empíricamente las proporciones necesarias para obtener una calidad de tono compensada.

en el tubo y generar un sonido estable. La segunda vuelta, que generalmente es la única otra que puede hacer sonar el tubo, corresponde aproximadamente a tres semilongitudes de onda de la corriente. Como la corriente tiene una admitancia muy baja en ese punto, el sonido generado será débil en comparación con el sonido en un punto del bucle externo de la espiral.

La espiral de admitancia que hemos estudiado hasta el momento presenta una complicación adicional si la deflexión de la corriente en el labio superior es mayor que la anchura de la corriente. En ese caso, la corriente prácticamente sopla dentro y fuera de la boca del tubo en cada ciclo y el impulso que da a la onda reflejada en el tubo es independiente de posteriores incrementos de la amplitud. La eficacia de la corriente como generador disminuye correspondientemente; la espiral de admitancia se reduce de tamaño a medida que se incrementa la amplitud de la deflexión de la corriente.

La pérdida de eficacia de la corriente al aumentar la amplitud de la deflexión viene acompañada por incrementos de pérdida de energía en el tubo de órgano. La oscilación en el tubo alcanza rápidamente su estado estacionario en una amplitud para la que la energía suministrada por la corriente equilibra la energía perdida por el tubo. Por sorprendente que resulte, en la mayoría de los casos, las pérdidas de energía debidas a la turbulencia y a la viscosidad son muy superiores a las pérdidas por radiación sonora en la boca y en el extremo abierto del tubo.



9. BOCA DE UN TUBO DE ORGANO DE LA FAMILIA DIAPASON. Se aprecian las muescas entalladas en el alma para obtener una turbulencia homogénea en la corriente de aire. El tubo se ha construido con "metal de órgano", aleación de plomo y estaño rica en este último metal, que solidifica dando el dibujo superficial que muestra la imagen cuando se funde en planchas, que se doblan luego en tubo.

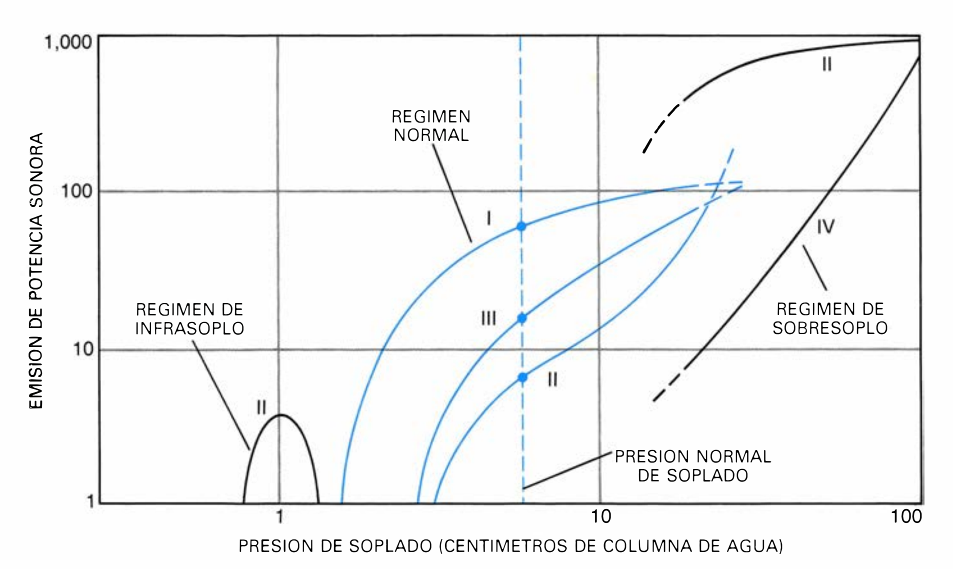
El sonido de un tubo de órgano real no está limitado a una sola frecuencia; posee muchos componentes de frecuencias superiores. Se puede demostrar que estos componentes son todos armónicos exactos, es decir, múltiplos enteros de la frecuencia base. En condiciones de soplado uniforme, la evolución de la onda sonora vista en un osciloscopio se mantiene constante. Hasta la más mínima desviación de los múltiplos en las frecuencias de los componentes conduciría a una ligera, pero claramente apreciable, variación de la forma de onda.

El interés de este comportamiento reside en que las resonancias de la columna de aire en un tubo de órgano, o en cualquier tubo abierto, tienen frecuencias que difieren ligeramente de los múltiplos exactos armónicos. ¿Por qué? Por la sencilla razón de que la longitud eficaz del tubo disminuye suavemente al incrementarse la frecuencia, en virtud de las variaciones de flujo acústico en los extremos abiertos. Como veremos, los armónicos del sonido de un tubo de órgano se generan por las interacciones de la corriente y el labio del tubo; el tubo actúa, pues, como un resonador pasivo en lo que se refiere a los armónicos superiores.

Las resonancias de un tubo se desarrollan cuando hay un movimiento máximo del aire en los extremos abiertos del tubo. Ello equivale a decir que la admitancia de un tubo de órgano debiera encontrarse en un máximo en la boca. Y a concluir: las resonancias de un tubo abierto en su extremo más lejano se producen con las frecuencias para las que la longitud del tubo es un número múltiplo entero de semilongitudes de onda para el sonido en el aire. Si la frecuencia fundamental es f_1, las resonancias superiores serán $2f_1$, $3f_1$, etcétera. (En realidad todas las frecuencias de resonancia superior se estiran un poco por encima de esos valores ideales, como apuntamos anteriormente.)

Para un tubo cerrado en su extremo más lejano las resonancias se producen cuando la longitud del tubo es un múltiplo impar de cuartos de longitud de onda. Por tanto, basta con que un tubo cerrado tenga una longitud mitad de un tubo abierto para producir la misma nota; sus resonancias están en f_1, $3f_1$, $5f_1$, etcétera.

Volviendo a la corriente de aire del tubo de órgano, vimos que las perturbaciones de alta frecuencia tendían a desaparecer a lo largo de la corriente conforme crecía su anchura, de suerte que, con independencia casi absoluta de los componentes de alta frecuencia del campo acústico de la boca del tubo, el extremo de la corriente en el labio superior se movía de un lado a otro, de forma casi sinusoidal, a la frecuencia del componente fundamental del sonido del tubo. Que el flujo de la corriente de aire sea sinusoidal no significa que la corriente penetre en el tubo sinusoidalmente, ya que el flujo se "satura", fluyendo dentro o fuera del labio supe-



10. EFECTO DEL CAMBIO DE PRESION de soplado sobre la emisión sonora de un tubo típico. Los números romanos indican unos cuantos armónicos iniciales. El régimen central (*color*) cubre la gama de la voz normal, con un buen balance a la presión normal de soplado. A presiones más altas, el tubo sobresopla, saltando a su segundo modo; a bajas presiones, sólo se produce un suave segundo modo.

rior en cada extremo de los límites de deflexión de la corriente de aire. Todavía más: el labio suele estar desplazado y no corta la corriente exactamente en su plano central, originando una saturación asimétrica. La forma de onda del flujo de la corriente que se introduce en el tubo contiene, por tanto, todos los armónicos de la frecuencia fundamental, fijados en una frecuencia y en una fase determinadas, y las amplitudes relativas de los armónicos de alta frecuencia crecen rápidamente a medida que aumenta la amplitud de la deflexión de la corriente.

En un órgano de tubos arquetípico, la distancia que se desvía la corriente en la boca es del mismo orden que el ancho de la corriente en el labio superior, lo que genera un amplio espectro armónico en el flujo de la corriente. Si la corriente chocara con el labio de forma simétrica, los armónicos pares no se excitarían. Suele desplazarse ligeramente el chorro para que se produzcan todos los armónicos.

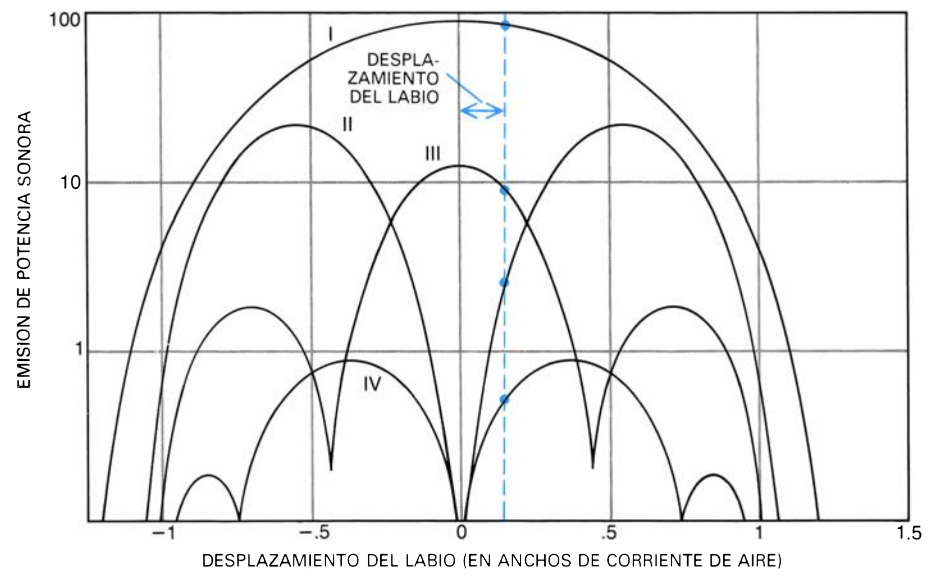
Como cabía esperar, la calidad de sonido de un tubo abierto no es igual que la que da un tubo cerrado. Las frecuencias de los armónicos de la fuerza motriz producida por la corriente son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental de la onda de la corriente de aire. La columna de aire en el tubo responderá vigorosamente a un armónico particular, en la hipótesis exclusiva de que la admitancia acústica del tubo sea grande, lo que corresponde a un máximo destacado de resonancia cercana a la frecuencia del armónico. Un tubo cerrado, que sólo tiene máximos de resonancia impares, suprime, pues, todos los armónicos pares de su fundamental. Se genera entonces un sonido "hueco" característico, donde los armónicos pares son débiles, aunque no ausentes del todo. Por el contrario, un tubo abierto tiene un sonido más "brillante", dado que responde a todos los armónicos de su frecuencia fundamental.

Las características de resonancia de un tubo se determinan principalmente por sus pérdidas energéticas, que son de dos tipos: (1) pérdidas por viscosidad y transmisión térmica a las paredes de los tubos y (2) pérdidas por radiación en la boca y en el extremo abierto. Las pérdidas por viscosidad y por transmisión térmica revisten una importancia en los tubos estrechos mayor que en los tubos anchos y mayor también a bajas frecuencias que a altas frecuencias. En las pérdidas por radiación ocurre lo contrario.

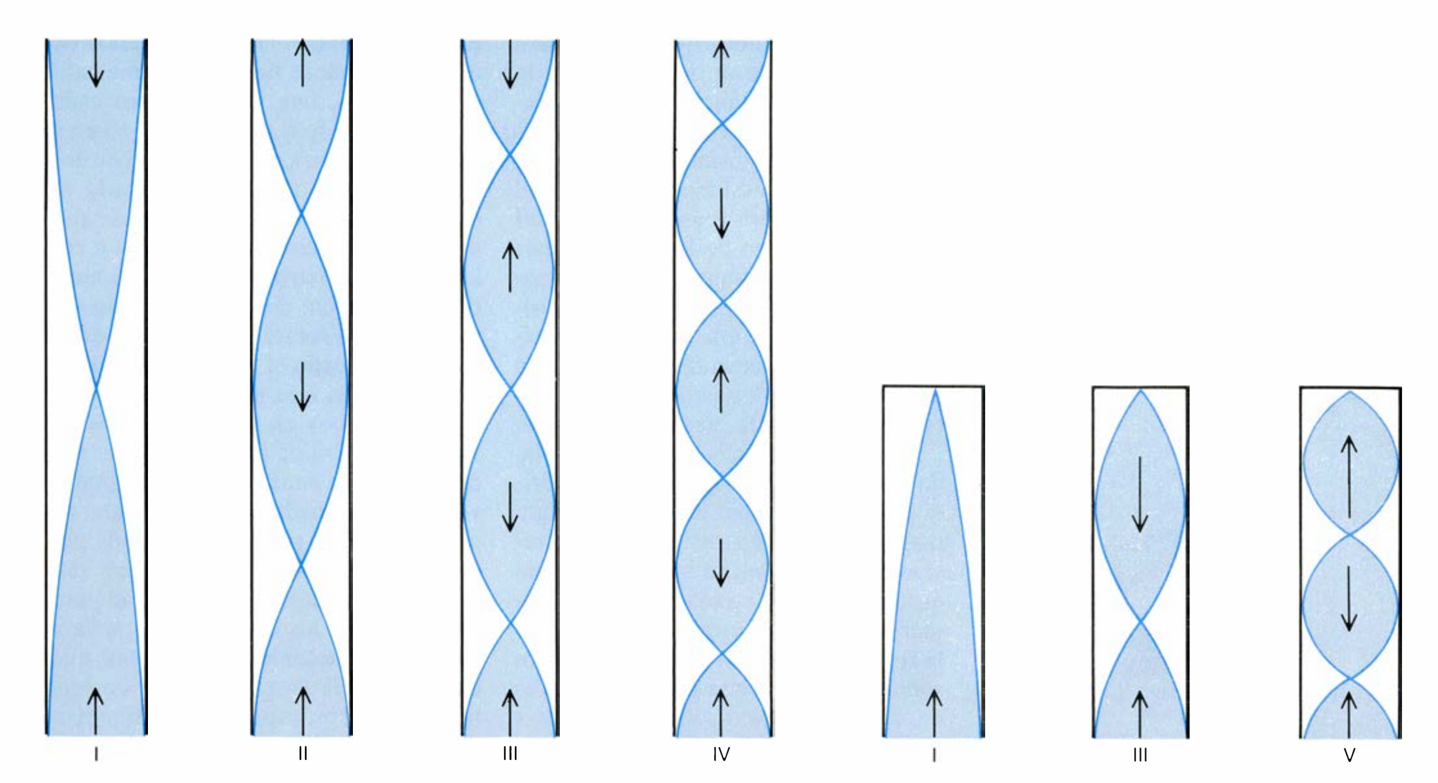
En definitiva, para una determinada longitud de tubo, y por ende para una determinada frecuencia fundamental, los tubos anchos son eficaces, y constituyen resonadores bien afinados, sólo para el fundamental y unos pocos primeros armónicos, lo que da un sonido sombrío y "aflautado". Los tubos estrechos son buenos resonadores para una amplia gama de armónicos y, como las frecuencias más altas se irradian con mayor eficacia que las bajas, el sonido será flaco; recuerda el timbre de las cuerdas. Entre estos dos extremos existen tubos con el sonido brillante y cristalino que caracteriza al buen órgano. Estos son los tubos que reciben el nombre de principales, o diapasones.

Un gran órgano puede disponer también de hileras de tubos con un cuerpo cónico, cierre perforado y otros diseños geométricos. Estas características se aplican para modificar las frecuencias de resonancia del tubo y, en cierta manera, para mejorar un sector muy estrecho de armónicos superiores con el objeto de producir un timbre particular. El material del tubo importa menos.

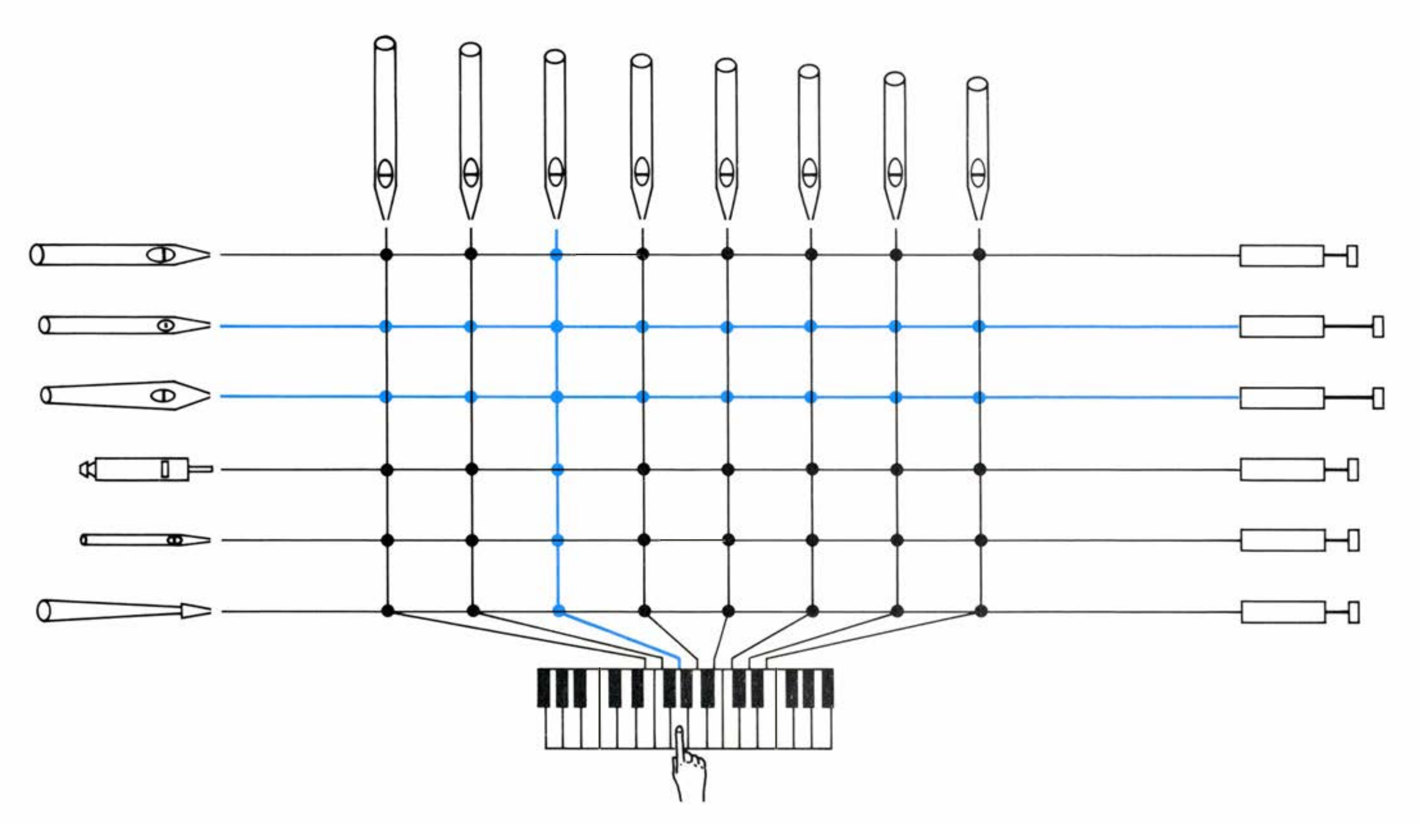
El aire contenido en un tubo vibra en uno cualquiera de una serie de modos posibles, lo que complica el comportamiento acústico de los tubos. Si la presión de soplado en un tubo abierto se aumenta de tal forma que en el chorro haya justo un cuarto de longitud de on-



11. EFECTO DE LA SITUACION DEL LABIO sobre los componentes armónicos, que demuestra la conveniencia del desplazamiento. Si el labio estuviera exactamente centrado en la corriente de aire, el tubo sólo daría la frecuencia fundamental (*I*) y el tercer armónico (*III*). Con el desplazamiento del labio en el punto indicado por la línea a trazos, aparecen los armónicos *II* y *IV*, enriqueciendo la calidad sonora.



12. FIGURAS DE RESONANCIA DE ONDAS ESTACIONARIAS, representadas esquemáticamente para tubos abiertos y tubos cerrados en su extremo superior. La anchura de los patrones de color corresponde a la amplitud de vibración acústica en varios puntos del tubo. El movimiento del aire corre paralelo al eje del tubo. Las flechas muestran la dirección del movimiento durante medio ciclo de vibración; durante el otro medio ciclo, el sentido se invierte. Los números romanos señalan el número de armónico y son proporcionales a las frecuencias de vibración. Un tubo abierto tiene resonancias para todos los armónicos del fundamental. Un tubo tapado basta que tenga la mitad de longitud para producir la misma nota, pero sólo produce resonancias para los armónicos impares. De hecho, los modelos vibratorios se extienden ligeramente por encima de los extremos del tubo (lo que exige una corrección por extremos) y la compleja geometría de la boca del tubo distorsiona algo los modelos en el extremo inferior del tubo, sin alterar su naturaleza "básica".



13. LOS TUBOS DE UN ORGANO se disponen a modo de filas y columnas de una matriz. En este diagrama simplificado, cada fila, denominada hilera o juego, consta de tubos de un mismo tipo, con un tubo para cada nota (*arriba*). Cada columna, asociada con una nota en el teclado (*abajo*), da acceso a todos los tubos de diversos tipos (*izquierda*). Los tiradores de la consola del órgano (*derecha*) dejan que entre aire a todos los tubos del canal de la tecla de esta nota. El mecanismo implicado determina que el aire llegue a un tubo sólo si se activa su fila y su columna. En la situación representada sonarán dos tubos.

da del primer modo, f_1, el punto para este primer modo se desplazará, en la espiral de la admitancia, a la mitad derecha, y la corriente dejará de mantener el modo. Al mismo tiempo, la frecuencia del segundo modo, $2f_1$, será tal que corresponderá a una semilongitud de onda a lo largo de la corriente, por lo que recibirá un fuerte impulso. El sonido del tubo saltará entonces a este segundo modo, casi una octava por encima del primero, cuya frecuencia exacta dependerá de la frecuencia de resonancia del tubo y de la presión de soplado.

Otro aumento en la presión de soplado puede excitar el siguiente modo, $3f_1$, si el corte del labio no es demasiado grande. A menudo sucede que una presión de soplado baja e insuficiente para excitar el fundamental excita suavemente uno de los modos superiores de la segunda espiral de admitancia. Estos sonidos de tubos con exceso o defecto de soplado, si bien son interesantes a nivel de laboratorio, no se explotan en los órganos de concierto, excepto para obtener efectos especiales.

El problema principal con el que se enfrenta el organero que ha creado un tubo de una calidad sonora adecuada es que ha de diseñar una serie de ellos que cubran la gama musical del teclado y que se ajusten entre sí en sonoridad y contenido armónico. Un juego de tubos geométricamente similares, en escala, en sentido ascendente o descendente en dimensiones, no cumple con este requisito: los tubos difieren en lo que respecta a las pérdidas por rozamiento en las paredes y por radiación a las diferentes frecuencias. Para lograr un comportamiento constante a lo largo del espectro acústico hemos de atenernos a una regla de proporcionalidad. Se modifica el diámetro del tubo con la longitud del mismo, elevándola a cierta potencia, k, cuyo valor es inferior a 1. Así, los tubos graves largos se construyen algo estrechos. El valor teórico de k es 5/6, es decir 0,83. Si se tiene en cuenta la psicofísica del oído humano resulta, sin embargo, más satisfactorio un valor de 0,75, muy próximo al que da la regla empírica desarrollada por los grandes organeros de los siglos XVII y XVIII.

Queda sólo por ver el mecanismo a través del cual se controla la emisión de sonido en esa multitud de tubos, muy importante desde el punto de vista del intérprete. El diseño básico es muy simple y recuerda las filas y columnas de una matriz. Se disponen los tubos en hileras, que corresponden a las filas de la matriz. Todos los tubos de una misma hilera tienen la misma calidad tímbrica; hay un tubo para cada nota del teclado o pedalero. El abastecimiento de aire a cada hilera lo controla un registro, que lleva marcado el nombre de la fila. El suministro de aire a los tubos asociados a cada nota o columna de la matriz lo controla la tecla de esa nota. Un determinado tubo sonará si y sólo si está en una hilera de la que se ha sacado el registro y en el canal de la tecla que se presiona.

Tenemos hoy en nuestras manos un sinfín de posibilidades para mejorar ese esquema, aplicando la lógica digital y válvulas accionadas eléctricamente en cada tubo. Los primitivos órganos poseían palancas mecánicas simples y válvulas de retención para permitir el paso del aire hasta los canales de la tecla y correderas mecánicas perforadas que controlaban la entrada de aire en una hilera de tubos. Aparte de su simplicidad y durabilidad, este sistema mecánico ofrecía al intérprete un control preciso sobre la abertura de la válvula del canal de la tecla y un sentido de aproximación al funcionamiento de un instrumento ya bastante mecánico de por sí.

A lo largo del siglo XIX y a principios del XX, se construyeron grandes órganos con todo tipo de mecanismos electromecánicos y electroneumáticos. Tras ese intervalo se ha vuelto a los sistemas de acción mecánica para teclas y pedales, con controles electrónicos sofisticados para ajustar las combinaciones de registros a medida que se va tocando el instrumento. El órgano de la sala de conciertos de la Sydney Opera House, por ejemplo, es el mayor órgano del mundo con acción mecánica. Terminado en 1979, consta de 10.500 tubos dispuestos en 205 hileras, distribuidas en cinco teclados y un pedalero. La acción de las teclas es mecánica, pero se duplica gracias a un sistema eléctrico, que posibilita el recurso a acoplamientos de tipo eléctrico y el registro digital de una interpretación en vivo (y a continuación recrear la interpretación original pasando la cinta que hace funcionar el órgano). Los registros y los enganches son todos eléctricos o electroneumáticos, controlados por microprocesadores dotados de una capacidad muy versátil de memoria de programas. Se combinan así las mejores posibilidades de la tecnología moderna con un diseño tradicional y la habilidad de los artesanos, siguiendo los principios conocidos desde hace siglos, para crear el sonido flexible y majestuoso de un gran órgano.

Origen de la radiación cósmica X de fondo

¿Dónde nace el resplandor difuso de rayos X que llena el universo en todas direcciones? Recientes descubrimientos sugieren que una de las fuentes plausibles podría ser una multitud de quásares remotos

Bruce Margon

A simple vista, en cualquier noche clara, se puede hacer una observación fundamental acerca de la estructura del universo. El espacio entre las estrellas es negro. El hecho de que la mayor parte de la luz visible del cielo emane de las distintas estrellas y el de que se agrupen en galaxias constituyen datos esenciales para la cosmología. Un observador que explore los cielos a longitudes de onda en las regiones ultravioleta, infrarroja o de radio del espectro hallará esa misma tendencia al agrupamiento en los componentes del universo. A las longitudes de onda mucho más cortas de la radiación X, sin embargo, la situación cambia por entero. Desde 1962 se sabe que cada porción del cielo emite un resplandor uniforme de rayos X. Tras dos decenios de intenso estudio, el origen de esta radiación X difusa de fondo es todavía motivo de debate.

Hay otro dominio de longitudes de onda en el que el cielo brilla también de un modo uniforme: en la región del espectro correspondiente a las microondas. No deja de ser curioso que la radiación de fondo en microondas se descubriera en 1965, poco después de la primera observación de la radiación X de fondo. Más tarde se determinaría el origen de la radiación de fondo en microondas; y, hoy, todos reconocen en ese fenómeno una clave muy valiosa para descifrar la evolución del universo. La mayoría de los astrofísicos consideran el resplandor en microondas como un residuo de la gran explosión que inició la fase de expansión en que nos hallamos.

Los rayos X y las microondas difieren, en cuanto a su respectiva longitud de onda concierne, en un factor de aproximadamente un millón de veces; en la naturaleza, una y otra clase de radiación electromagnética se originan, normalmente, bajo condiciones físicas muy distintas. En consecuencia, no hay razón para esperar ninguna forma de relación directa entre los dos tipos de radiación cósmica de fondo. Pese a ello, la radiación de fondo en microondas representa, para los estudiosos de la radiación X de fondo, un indicio sugestivo y una molesta frustración a la vez. Indicio porque una mejor comprensión del origen de la radiación X de fondo, aunque todavía esquiva, puede revelar, andando el tiempo, pistas relativas a la estructura en gran escala del universo con la solidez de las consecuencias sacadas de la radiación en microondas. La frustración estriba en que, si bien el estudio de ambos fenómenos comenzó por el mismo tiempo, podemos explicar ya con cierto detalle la radiación en microondas, mientras que no hay acuerdo general ni siquiera sobre cuál sea el mecanismo físico básico que origina la radiación X de fondo.

Este desfase en nuestro conocimiento de una y otra clase de radiación cósmica de fondo cabe atribuirlo, en parte, a las diferentes técnicas de observación empleadas a esas dos longitudes de onda. Las microondas, cuya longitud varía desde 0,1 centímetro a 10 centímetros, penetran fácilmente en la atmósfera terrestre; por consiguiente, pueden detectarse mediante antenas instaladas en tierra. En la región espectral donde se descubrió la radiación X de fondo, entre un angstrom y 100 angstrom (es decir, entre una cienmillonésima y una diezmillonésima de centímetro), la atmósfera terrestre es completamente absorbente. Las observaciones astronómicas a esas longitudes de onda requieren por tanto que se coloque el detector por encima de la atmósfera. Los cohetes V-2 alemanes capturados por Norteamérica al final de la segunda guerra mundial proporcionaron a los astrónomos estadounidenses su primera oportunidad de elevar instrumentos astronómicos hasta el espacio. Un detector de rayos X bastante rudimentario que se transportó en uno de esos primeros vuelos reveló que la corona solar, esa tenue y extremadamente caliente capa externa del Sol, constituía una fuente segura de radiación X.

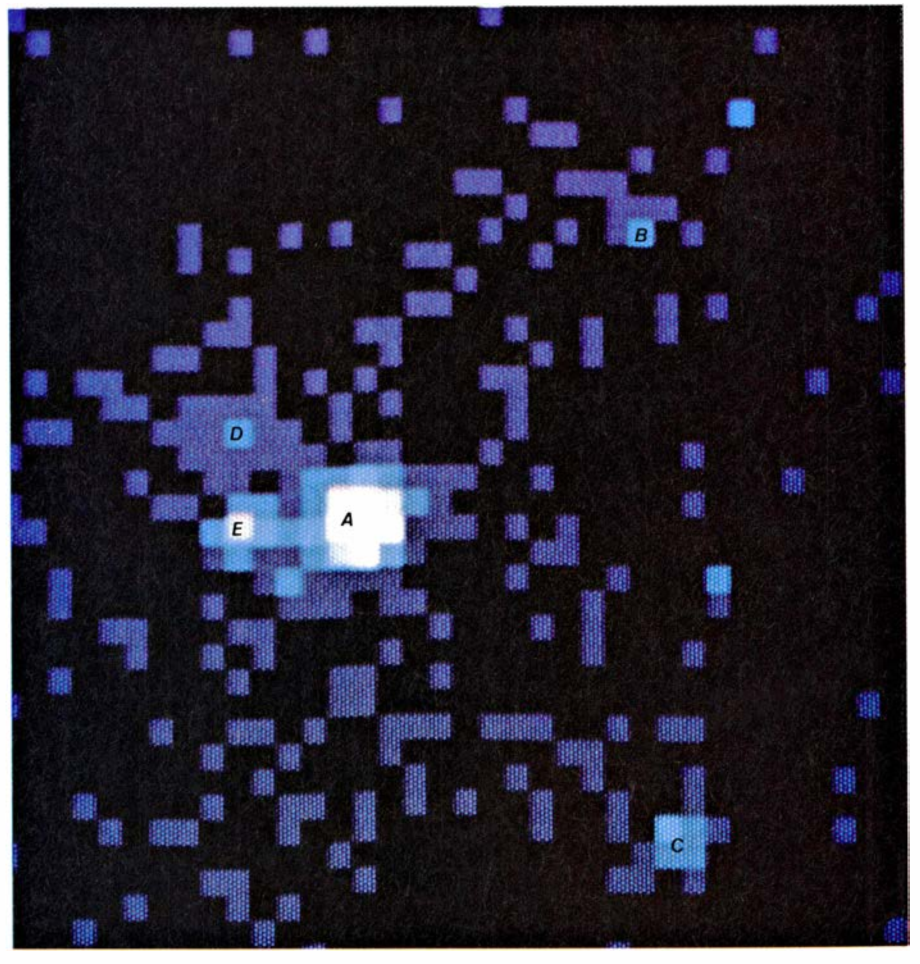
El descubrimiento de los rayos X procedentes del Sol fue un triunfo en un aspecto: inauguró una nueva técnica observacional en astronomía. Pero en otro sentido representó un contratiempo. La intensidad de los rayos X solares es extremadamente baja: del orden de la millonésima de la energía emitida por el Sol en el visible. Armados con esta relación, y sabiendo que el Sol es una estrella normal, se puede calcular la emisión en rayos X que cabe esperar de los 100.000 millones de otras estrellas que, en números redondos, suma nuestra galaxia. El cálculo revela que incluso la más próxima de las estrellas vecinas al Sol debería aportar a la Tierra unas 40.000 millones de veces menos radiación X que aquél. Dicho de otra manera, detectamos los rayos X procedentes del Sol por su cercanía a nosotros y no porque se trate de ningún objeto especial. Así, el primer éxito de la astronomía de rayos X –la detección de los rayos X procedentes del Sol– parecía indicar que la emisión de tal radiación no aportaría gran cosa al desarrollo de la astronomía estelar, al menos en lo concerniente al estudio de la inmensa mayoría de estrellas normales.

Por fortuna, ese razonamiento no impidió que Riccardo Giacconi y sus colegas de American Science and Engineering, Inc., explorasen el papel potencial de las observaciones de rayos X en la investigación de objetos estelares

anómalos. En 1962 construyeron un detector mejorado de rayos X que, a bordo de un pequeño cohete, se elevó durante un corto tiempo por encima de la atmósfera. La sensibilidad del nuevo detector superaba, en un refinamiento apreciable, la que caracterizaba a los detectores de rayos X hasta entonces elevados para observar el Sol; era el primero de tales dispositivos que se lanzaba al espacio con sensibilidad suficiente para detectar fuentes de rayos X fuera del sistema solar, si es que realmente esas fuentes existían.

Los experimentos de Giacconi dieron por resultado dos espectaculares descubrimientos. Primero, se halló una fuente puntual discreta de rayos X en la dirección de la constelación del Escorpión. Aunque la radiación X de esta fuente era un millón de veces más débil que la del Sol, revelaba una intensidad muy superior a la que las estimaciones asignaban a una radiación X procedente incluso de la estrella más inmediata. El objeto recién descubierto, inscrito con el nombre Sco X-1, sólo se pudo ubicar de una manera aproximada en la primera observación; resultó pues im-





1. QUASARES Y ESTRELLAS NORMALES rivalizan en su parecido en una fotografía ordinaria con luz visible (*arriba*), pero pueden distinguirse fácilmente con ayuda de la correspondiente imagen en rayos X (*abajo*). La fotografía reproducida aquí en forma de negativo, para preservar los detalles finos, se obtuvo por medio del telescopio Schmidt de 1,2 metros del Monte Palomar. Muestra una región del cielo que mide aproximadamente medio grado de lado (que viene a coincidir con el diámetro angular de la luna llena) en la constelación de Hércules. La fotografía reúne unas 1000 imágenes semejantes a estrellas, la inmensa mayoría de las cuales son estrellas normales de nuestra galaxia. En consecuencia, cualquier técnica de selección ideada para identificar el corto número de quásares con probabilidad de hallar en tal región debe descartar, de un modo eficaz, las estrellas de la parte cercana. La imagen de rayos X en falso color de la misma región se elaboró a partir de datos registrados por un detector de rayos X a bordo de un satélite orbital llamado Observatorio Einstein. Sólo hay cinco fuentes de rayos X claramente discernibles; cuatro de ellas pueden estar asociadas a quásares. La fuente rotulada *A* es un quásar conocido de antemano que sirvió de blanco en esta exposición; designado 3C 345, se le ubica a 7200 millones de años-luz de distancia de la Tierra. Las otras cuatro fuentes de rayos X fueron descubiertas en esta imagen. Basándose en observaciones espectroscópicas hechas con grandes telescopios, el autor y sus colaboradores determinaron que las fuentes de rayos X descubiertas accidentalmente y rotuladas *B*, *C* y *D* eran quásares todavía por catalogar. Las fuentes *B* y *C* se encuentran a 9500 y 6700 años-luz de distancia, respectivamente; la fuente *D* es la emisión combinada de dos quásares separados, uno a 7900 millones de años-luz y la otra a 7200 millones de años-luz. La fuente *E* coincide con la galaxia, bastante próxima y anómala, NGC 6212; dista de nosotros tan sólo 560 millones de años-luz. Las contrapartidas ópticas de las fuentes de rayos X se indican en la fotografía superior. La imagen de rayos X fue suministrada por Gary A. Chanan, de la Universidad de Columbia.

posible determinar si la fuente de la emisión de rayos X correspondía a un objeto visible. Sucesivas generaciones de experimentos realizados por grupos de astrónomos de varios países han venido encontrando, desde entonces, cientos de tales objetos emisores de rayos X en la galaxia; el análisis detallado de los mismos ha permitido que hoy conozcamos muy bien esas fuentes galácticas de rayos X.

Se confirmó la predicción según la cual sólo podrían detectarse rayos X que procedieran de algunas estrellas normales que se hallaran muy cercanas a nosotros. Otras fuentes, Sco X-1 por ejemplo, son sistemas estelares mucho más alejados y anómalos. La radiación X procedente de estas últimas se origina mediante un proceso que lleva consigo el intercambio de materia estelar entre una estrella de características diríamos corrientes y otra estrella altamente evolucionada y compacta que describe una órbita próxima en su entorno. La compañera compacta de tal sistema binario emisor puede ser una enana blanca, una estrella de neutrones o incluso un agujero negro.

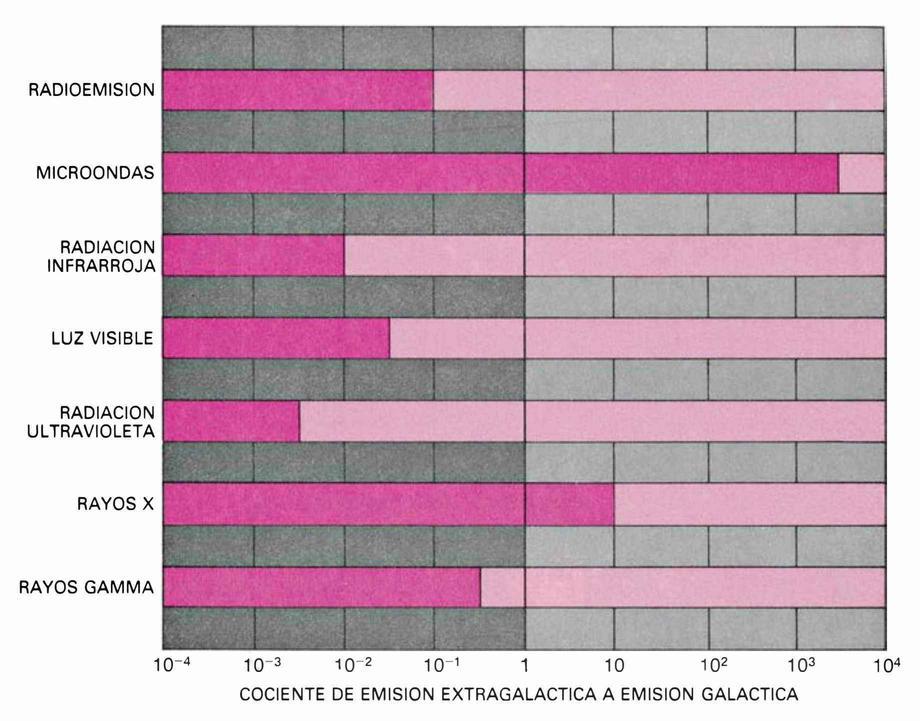
Los pocos minutos de datos obtenidos en este primer experimento "extrasolar" de rayos X trajeron algo más que el descubrimiento de Sco X-1. Para sorpresa nuestra, el cohete portador del detector giraba rápidamente sobre sí mismo durante su breve ascenso y descenso, con lo que barría así una porción substancial de la esfera celeste. Contrariamente a lo que se esperaba, el detector registró una intensidad de radiación X aparentemente constante en todo momento durante las observaciones por encima de la atmósfera, con independencia de la dirección hacia la que apuntase el detector. El descubrimiento de la radiación X difusa de fondo se produjo, pues, simultáneamente con el comienzo de la astronomía estelar de rayos X.

Al igual que ha ocurrido con las fuentes estelares de rayos X, también la radiación X de fondo ha sido objeto de estudio de casi todos los experimentos que se han venido realizando en astronomía de ese tipo de emisión. Requería el primer proyecto vuelos adicionales de cohetes; a lo largo de los últimos 10 años, los detectores se han transportado a bordo de satélites en órbita. La investigación ha ido revelando varias propiedades fascinantes de la radiación X de fondo. Quizá deba destacarse la intensidad uniforme de la radiación procedente de las diferentes partes del cielo. Cada región del cielo presenta un brillo en rayos X igual al de las regiones vecinas dentro de la precisión de las mejores medidas disponibles en la actualidad. (Las observaciones habrían podido detectar fluctuaciones en brillo de alrededor del 1 por ciento entre regiones adyacentes del cielo con una extensión angular del tamaño de la luna llena, aproximadamente.) Dicho de otra manera, la radiación X de fondo evidencia una extraordinaria isotropía: cualquiera que sea lo que origina la radiación de fondo, produce igual número de rayos X desde cualquier dirección del cielo con un error inferior al uno por ciento. (Se sabe que la radiación de fondo en microondas es también muy isotrópica, con un grado de precisión aún más alto: unas 2999 partes en 3000.)

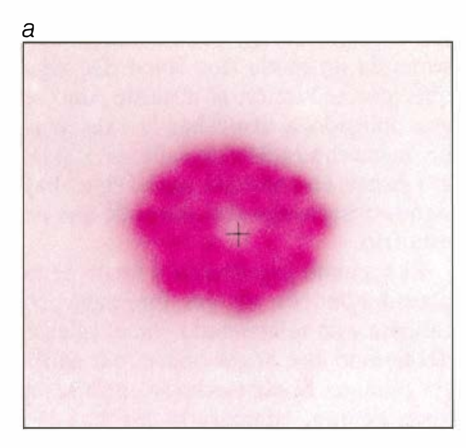
Tan perfecta isotropía de la radiación X de fondo nos señala una pista valiosísima acerca de su origen. Pista que nos indica que la fuente (o fuentes) de la radiación se halla, o bien muy cerca, o bien muy lejos, pero en ningún caso a una distancia intermedia. La posibilidad de una fuente cercana es fácil de entender; un observador inmerso de lleno en la radiación procedente de una fuente próxima percibiría un resplandor isotrópico. Pero en el caso de los rayos X de fondo resulta difícil postular una fuente de rayos X altamente uniforme en la vecindad del sistema solar.

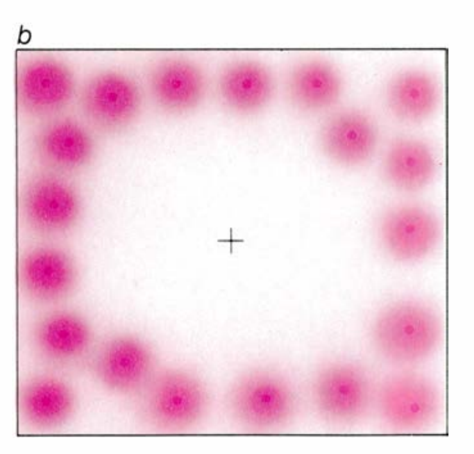
¿Por qué la alternativa es un origen de la radiación extremadamente distante? Para comprenderlo, razonemos el siguiente argumento *ad absurdum*: consideremos una distribución hipotética de emisores de rayos X a un intervalo intermedio de distancias, las correspondientes a la separación entre las estrellas de nuestra galaxia o incluso entre las galaxias próximas. Habría, en esa suposición, uno o varios emisores en alguna dirección que estuvieran más cercanos al sistema solar que los emisores restantes. Cuando se mirase en esa dirección, se observaría una mancha brillante correspondiente a la fuente de radiación más próxima.

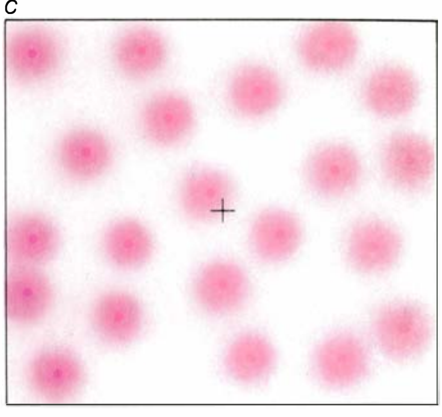
Sin embargo, esta conclusión contradiría la observación original según la cual la radiación X de fondo era altamente isotrópica: al parecer, no hay porciones de materia emisora de rayos X en ninguna parte del cielo. La única explicación razonable es que la mayor parte de la radiación procede de enor-



2. RELACION ENTRE LA ENERGIA ELECTROMAGNETICA fuera de nuestra galaxia a la que se sabe existe dentro de la galaxia. Esa relación, que mediría cualquier observador, se representa con las barras en color para diferentes partes del espectro. En siete de los nueve intervalos espectrales que se muestran, la relación es menor que la unidad; significa ello que la energía por unidad de volumen en esas longitudes de onda es mayor en el interior de la galaxia que fuera de ella. En otras palabras, al observador exterior le parecería que la fuente dominante de radiación a esas longitudes de onda se concentra dentro de las galaxias, siendo escasa la radiación emitida en el espacio que media entre las mismas. En dos longitudes de onda, sin embargo, sucede al revés: la energía de radiación que llena el universo es mayor que la energía de radiación dentro de la galaxia a las mismas longitudes de onda. En este último caso, el observador encontraría difícil distinguir las galaxias, ya que éstas quedarían ocultas por la radiación de fondo. A diferencia de la radiación de fondo en microondas, que se interpreta generalmente como un residuo de la gran explosión inicial, la radiación X de fondo continúa envuelta en el misterio. El diagrama se adaptó de otro ideado por el profesor Joseph Silk, de la Universidad de California en Berkeley.







3. LA EXTREMADA ISOTROPIA, o uniformidad, de la radiación X de fondo implica que se origina o muy cerca de la Tierra o muy lejos, pero no a una distancia intermedia. Si las fuentes de la radiación fueran todas próximas (*a*), el observador se hallaría bañado en radiación y vería un resplandor uniforme. Pero si las fuentes estuvieran remotísimas (*b*), la distancia del observador a las fuentes podría diferir ligeramente, aunque la diferencia sería pequeña comparada con la distancia media; no se observarían manchas luminosas. Si la radiación se originase a una gran variedad de distancias intermedias (*c*), la diferencia entre una fuente próxima y otra distante adquiriría un relieve importante; podría esperarse entonces que parte del cielo, la correspondiente a la fuente más próxima, apareciera como una mancha luminosa. Signos de distinta índole apuntan hacia un origen remotísimo de la radiación X de fondo, aunque todavía haya puntos obscuros que impiden decidir si la fuente es un gas difuso, un conjunto de objetos discretos o combinación de ambos.

mes distancias, que son de hecho comparables con las de los objetos del universo más alejados. Como ocurrió con la radiación de fondo en microondas, la explicación que con el tiempo se dé a la radiación X difusa de fondo tendrá seguramente alguna relación con la cuestión cosmológica de la estructura global y la evolución del universo.

Una segunda pista acerca del origen de la radiación X de fondo nos la ofrece el dato siguiente: se genera radiación X y no radiación de otra longitud de onda mayor. La radiación X es una de las formas de radiación electromagnética de más energía; de aquí que la fuente de la emisión observada debe corresponder a un proceso de alta energía. Además, el proceso debe ser tal que pueda actuar en las condiciones que prevalecen en la escala del universo.

Desde hace decenios, los físicos conocen un proceso de esos. Está relacionado con el gas extremadamente caliente y diluido que llamamos plasma. En tal gas, los electrones y los protones, que normalmente se hallan ligados entre sí formando átomos, aparecen como una mezcla no ligada de partículas en rápido movimiento. Por tener cargas eléctricas opuestas el electrón y el protón, existe una fuerza atractiva entre pares próximos de electrones y protones en el plasma; es corriente que los electrones libres atraídos por protones libres pasen muy cerca de ellos sin llegar a chocar. Desde el advenimiento de la física cuántica, a principios de siglo, se sabe que un electrón que pasa cerca de un protón libre pierde parte de su energía, y que esa energía perdida la transporta un paquete discreto de energía electromagnética: un fotón. La radiación creada por la interacción de un electrón y un protón se conoce como bremsstrahlung ("radiación de frenado", en alemán).

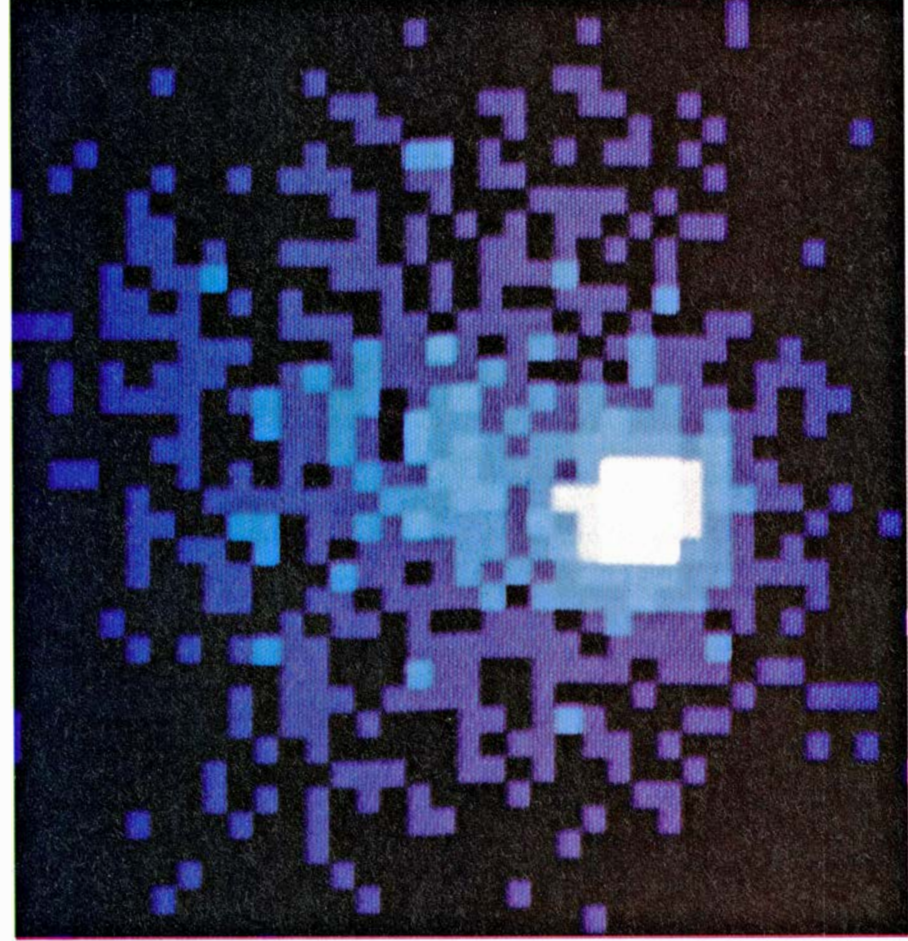
La longitud de onda exacta (o dominio de longitudes de onda) de los fotones creados por el proceso de bremsstrahlung es una función que varía con la temperatura del plasma. Para un plasma con una temperatura de entre 10 y 500 millones de grados Kelvin, es de esperar que el bremsstrahlung genere rayos X con longitudes de onda predominantemente entre un angstrom y 10 angstrom. ¿Hay alguna razón para esperar que el universo esté más o menos uniformemente lleno de un plasma muy caliente que genere, mediante el proceso de bremsstrahlung, la radiación que se observa hoy en forma de rayos X de fondo? No sólo una, sino varias son las razones para sospechar la existencia de un tal gas caliente.

Aunque juzgado con criterios terrestres el espacio entre las estrellas de la galaxia constituye un excelente vacío, contiene en realidad una apreciable cantidad de gas enrarecido. El medio interestelar da cuenta de sólo un 10 por ciento de la masa representada por todas las estrellas de la galaxia, pero desempeña un papel fundamental en la evolución galáctica: es la materia prima a partir de la cual se forman las nuevas estrellas. Los astrónomos han tratado de comprender desde hace mucho tiempo cómo, por analogía, surgen en último término las enormes aglomeraciones de materia que se convierten en galaxias. Parece probable, aunque no lo sea en modo alguno seguro, que las galaxias se condensaron a partir de un gas enrarecido que llenaba la totalidad del universo poco tiempo después de la gran explosión: el medio intergaláctico.

Conviene no perder de vista la naturaleza hipotética de este escenario; aunque podemos contemplar el medio interestelar y sepamos que la formación de estrellas es un proceso que continúa activo en nuestra galaxia, el medio intergaláctico no se ha observado directamente y la formación de galaxias cesó en todo el universo hace miles de millones de años. Sin embargo, hay razones para sospechar que quizá quede todavía parte del medio intergaláctico. Pocos procesos de la naturaleza operan con un rendimiento del 100 por ciento y sería de maravillar que el proceso de formación de galaxias hubiera barrido hasta el último átomo del medio original.

Si hemos de explicar la radiación X difusa de fondo como bremsstrahlung procedente de un medio intergaláctico, tendremos que responder a esta otra pregunta: ¿es razonable suponer que tal plasma alcance las altísimas temperaturas que requiere la generación de rayos X? Dos consideraciones abonan la plausibilidad de esta hipótesis. La primera es un argumento por eliminación. Si el medio intergaláctico existe, y si el gas estuviera tan frío como el medio interestelar, entonces tal gas, interpuesto entre nuestra galaxia y objetos muy distantes, produciría características de absorción observables en el espectro de luz visible de esos objetos distantes. Estas características de absorción, de las que se puede mostrar que tienen un aspecto muy específico, se han buscado con toda atención y se ha visto que suelen faltar. Si hay gas intergaláctico y frío, no será lo sufi-





cientemente ubicuo para llenar el universo de un modo isotrópico. De aquí que, por reducción al absurdo, uno se vea obligado a sospechar la existencia de un gas intergaláctico caliente; y si tal gas existe en cantidad apreciable, hay signos observacionales claros de que no está frío.

El segundo argumento a favor de la plausibilidad de un gas intergaláctico caliente está relacionado con el cálculo del tiempo que el gas podría permanecer caliente. Si ese medio se enfriase en poco tiempo, comparado con la edad asignada hoy al universo, se encontraría uno en la difícil situación de tener que explicar no solamente cómo alcanzó el gas tan prodigiosa temperatura en su comienzo, sino también cuál es el mecanismo que continúa recalentándolo a lo largo de la vida del universo, posibilitando la radiación X de fondo que nos es permitido observar. La verdad es que no encierra mayor problema calcular que, en un plasma tan diluido, el tiempo de enfriamiento comprendería la edad actual del universo, si es que no la rebasa.

El bremsstrahlung es un medio poco eficaz de extraer energía de un gas tan enrarecido. Y no se ve otro mecanismo probable de enfriamiento. Admitiendo que hubiese una manera de calentar el gas intergaláctico una vez, en los primeros tiempos de evolución del universo, debería esperarse que el gas continuase caliente hoy. Se cree que en las violentas fases iniciales del universo pudo haber cierto número de esas verosímiles fuentes de calor. Aunque la tempertura del gas es muy alta, se puede demostrar que la cantidad de gas en cualquier porción restringida del uni-

4. CUMULO RICO DE GALAXIAS. Esa aglomeración nos sirve de prueba a favor de la existencia, a escala cósmica, de un plasma emisor de rayos X, es decir, un gas caliente de partículas eléctricamente cargadas. La fotografía en luz visible reproducida arriba en forma de negativo muestra el cúmulo Abell 2151, según se distingue con el telescopio Schmidt del Monte Palomar. El cúmulo, que está en la constelación de Hércules, se encuentra a unos 670 millones de años-luz de la Tierra. La imagen de rayos X en falso color de la parte inferior, nuevamente suministrada por Chanan, muestra la misma región del cielo tal como la apreciaba el Observatorio Einstein. En lugar de las galaxias individuales que se ven en la imagen de luz visible, la imagen de rayos X revela una extensa nube de gas caliente, de unos tres millones de años-luz de diámetro, arrastrada por la atracción gravitatoria combinada del conjunto de galaxias. El medio intracumular tiene un diámetro angular de unos 0,25 grados, es decir, la mitad del diámetro de la luna llena. Se ha encontrado en muchos cúmulos similares de galaxias un plasma de esta clase, cuya temperatura, a partir de su emisión de rayos X, se estima en el orden de los 20 millones de grados Kelvin.

verso es, probablemente, mínima. Así pues, el contenido total de energía del gas, y por consiguiente la energía que haría falta suministrar a través de ese viejo mecanismo de calentamiento, aunque grande, no es insuperable.

Hay precedentes observacionales de la existencia de cantidades apreciables de plasma cósmico muy caliente, pero no en la forma omnipresente que requiere un medio intergaláctico. Por doquier en el universo, vemos que las distintas galaxias tienden a agruparse en grandes cúmulos ligados por la fuerza de la gravedad. Los cúmulos más ricos albergan centenares y hasta millares de galaxias miembros. Uno de los primeros descubrimientos de la astronomía de rayos X fue que los cúmulos ricos parecían fuentes detectables de rayos X. Estudios detallados de los rayos X procedentes de los cúmulos revelaron que la emisión no se debía a la suma de las distintas fuentes de las galaxias que constituían el cúmulo. Antes bien, la emisión, extensa y difusa, llenaba el espacio entre las galaxias miembros y frecuentemente tenía una extensión espacial comparable con la del propio cúmulo. Esta emisión de rayos X se atribuye ahora a bremsstrahlung procedente de un plasma caliente (típicamente entre 20 y 60 millones de grados Kelvin) que llena el volumen del cúmulo y coexiste con las galaxias miembros.

La cantidad de materia en el medio intercumular se estima a partir del brillo de los rayos X observados. Y se deduce que viene a ser la masa total de cuantas galaxias componen el cúmulo. Por consiguiente, no parece que, al menos en esos cúmulos ricos, el plasma caliente sea un estado exótico de la materia; todo indica que se trata de una forma dominante. Las observaciones de rayos X del gas intercumular, realizadas en los últimos años, aportan datos que revelan su origen en las galaxias miembros; el gas lleva el sello de elementos químicos que, como el hierro, se producen sólo en las estrellas, según se cree. Así, el medio intercumular siguió, probablemente, a la existencia de las galaxias; no la precedió. En cuanto tal, no representaría al medio intergaláctico caliente. Pese a ello, persiste como muestra de que el universo contiene, al menos en ciertos lugares, grandes cantidades de plasma muy caliente y emisor de rayos X.

Aceptemos, provisionalmente, la hipótesis según la cual la radiación difusa X de fondo surja de un proceso de bremsstrahlung de un medio intergaláctico caliente. Aparte de resolver una curiosidad observacional que dura dos decenios, ¿tendría tal plasma otras propiedades de interés? La respuesta es decididamente afirmativa. A finales del decenio de 1920, Edwin P. Hubble y sus colegas del Observatorio del Monte Wilson establecieron, tras observar las características espectrales de las galaxias, que todas las galaxias que se hallaban inmediatas, aunque fuera ya del grupo local, se estaban alejando de él; en una palabra, el universo en conjunto se estaba expandiendo. Este descubrimiento condujo a la idea de que al menos la fase actual de la evolución del universo había tenido un comienzo discreto en una densa y violenta fase; la observación de la radiación de fondo en microondas corroboraría esta idea.

¿No cesará nunca la fase de expansión? Si el proceso durara por siempre, el universo se convertiría en un lugar bastante aburrido dentro de 10.000 o 20.000 millones de años. No sólo las galaxias se habrían alejado mucho de sus inmediatas. Por ser la evolución estelar un proceso finito y en una sola dirección, que con el tiempo convierte materia galáctica en débiles estrellas compactas (enanas blancas, estrellas de neutrones y posiblemente agujeros negros), las galaxias terminarían por agotar las fuentes internas de luminosidad y desaparecerían lentamente de nuestra vista; una predicción sombría que se apoya en la hipótesis de la expansión indefinida. La existencia del medio intergaláctico puede, en principio, alterar el destino de la expansión.

Hay una fuerza que se opone a la expansión universal, a saber, la atracción gravitatoria que cada átomo experimenta por parte de todo otro átomo. Si la autogravitación del universo es suficientemente intensa, la expansión llegará a detenerse con el tiempo, e invertirá su signo convirtiéndose en una contracción impulsada por la gravitación. ¿Cómo resolver semejante dilema? Desde el punto de vista de la observación, los astrónomos de hoy no han avanzado más allá de donde Hubble llegó hace medio siglo: la fase actual del universo es expansiva. Curiosamente, la predicción de su futuro destino –expansión continua o contracción con el tiempo– no es, de suyo, ningún proceso complicado. La magnitud de la fuerza gravitatoria depende sólo de la cantidad de materia que entra en juego y de la distancia entre la materia; si a ello añadimos que la velocidad de expansión y la escala del universo de hoy se pueden deducir, al menos en principio, de las observaciones de la expansión de las galaxias, la cuestión sobre inversión o no de la expansión equivale, de hecho, a un problema de cálculo de la cantidad total de materia que encierra el universo.

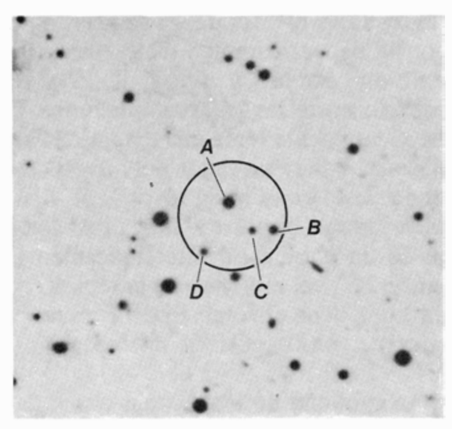
De una forma más rigurosa, la magnitud a estimar será la densidad de masa del universo (es decir, la cantidad de masa en un pequeño volumen cualquiera). Por encima de cierto umbral, conocido por densidad crítica, la expansión terminará por detenerse y comenzará a contraerse. Pero si la densidad media de masa en el universo cae por debajo de la densidad crítica, la expansión continuará incesante. La mejor estima que disponemos del valor de la densidad crítica es extremadamente pequeña, debido, en parte, al inmenso volumen ocupado por el universo; dicho valor equivale a un promedio de aproximadamente un átomo de hidrógeno por metro cúbico en toda la extensión del universo.

Concedida la posible existencia del medio intergaláctico, se supone, además, que la mayor parte de la materia existe dentro de las galaxias en forma de estrellas y, en menor grado, de gas y polvo. Estimar la masa de las galaxias es un proceso complicado e indirecto, pero el resultado a que se llega en este contexto es tan sorprendente que quizá no tengan una importancia decisiva las inexactitudes inherentes. ¿Y cuál es la conclusión? Las galaxias dan cuenta de sólo el 1 o el 2 por ciento de la densidad crítica. Por tanto, aun teniendo presente la incertidumbre en la evaluación de la materia galáctica, parece improbable que las galaxias normales suministren materia suficiente para detener la expansión.

La existencia de la radiación X difusa de fondo y su posible origen en un plasma intergaláctico exigen, sin embargo, que se reconsidere tal cálculo. Si la densidad de masa en el medio intergaláctico excede, en un factor de 50 o 100, la densidad media de masa en el universo atribuible a las galaxias el universo tendría su densidad crítica y la predicción de su evolución futura cambiaría radicalmente. Además, quedaría al descubierto un hecho curioso: los astrónomos habrían estado despreciando el 99 por ciento de la masa del universo. ¡Las galaxias luminosas, así como su contenido, quedarían relegadas al papel de una mínima impureza en el medio intergaláctico!

Si la radiación X de fondo se debe al medio intergaláctico, se calculará la

densidad de masa del medio midiendo la intensidad observada de la radiación de fondo (esto es, cuánta radiación X llega a la Tierra cada segundo procedente de una dirección dada) y determinando entonces teóricamente cuántos átomos por unidad de volumen se requieren para crear esta cantidad de radiación mediante el proceso de bremsstrahlung. El resultado de este cálculo demuestra ser desesperante. Si la radiación X de fondo se emite de un bremsstrahlung procedente de un plasma caliente, entonces, y dependiendo de los valores exactos de varias magnitudes bastante mal conocidas por ser difíciles de medir, la densidad que se deduce para el plasma caliente intergaláctico es comparable con la densidad crítica del universo.



A
B
C
D
INTENSIDAD RELATIVA DE EMISION
4000 5000 6000 7000 8000
LONGITUD DE ONDA (ANGSTROM)

5. DESCUBRIMIENTO FORTUITO de un quásar emisor de rayos X hasta ahora sin catalogar. En el curso de un estudio de la emisión de rayos X de un sistema estelar binario en la constelación de Acuario, se observó, en una imagen de rayos X del Observatorio Einstein, una segunda fuente de rayos X cercana. A partir de los datos de rayos X, sólo se podía establecer aproximadamente la posición que correspondía a la nueva fuente. En una fotografía en luz visible de la misma región del cielo (*arriba*), hecha con el telescopio Schmidt del Monte Palomar, se ha trazado una circunferencia alrededor de la región donde parecía ubicarse la fuente de rayos X. Dentro del círculo, se ven cuatro objetos semejantes a estrellas; todos se consideraron fuente potencial de rayos X. El autor y sus colaboradores obtuvieron espectros de cada uno de esos objetos, extremadamente débiles, con el reflector Shane de tres metros del Observatorio Lick (*curvas de la derecha*). Los primeros tres espectros tienen mínimos destacados donde los átomos fríos de las capas exteriores del objeto han absorbido, al parecer, radiación del interior. Tales bandas espectrales de absorción son características de estrellas normales, lo que indica que quizás esos tres objetos no tengan mucho que ver con la fuente de rayos X. El cuarto espectro ofrece un aspecto peculiar: prominentes máximos que corresponden a exceso de emisión en ciertas longitudes de onda. Se trata de la marca indicadora de un quásar que, en este caso, por las características de su espectro, se le aloja a unos 3800 millones de años-luz de distancia. Designado 2216-043 según sus coordenadas celestes, el quásar recién descubierto es la contrapartida óptica de la fuente fortuita de rayos X.

¿Ha alterado, pues, el descubrimiento de la radiación X de fondo nuestro marco teórico sobre la expansión futura del universo? La radiación de fondo no es más que un indicio, pero ninguna prueba, de que exista una densidad crítica de la materia intergaláctica. Hay tres puntos oscuros en esta cadena de argumentos. En primer lugar, el valor de la densidad crítica depende, en forma muy notable, de la velocidad de expansión del universo: cuanto más rápidamente se alejen las galaxias entre sí, tanto mayor será la cantidad de materia necesaria para frenar la expansión. Las estimas de esta velocidad, incorporada en la magnitud conocida por constante de Hubble, se deducen de una complicada sucesión de mediciones astronómicas sometidas a diversas incertidumbres. De hecho, el valor aceptado de esta constante ha cambiado bastante de Hubble acá. Sólo para un valor específico (y hoy un tanto impopular) de la constante de Hubble, la cantidad estimada de medio intergaláctico proporciona la densidad crítica de materia.

Vayamos al segundo punto oscuro. La anterior determinación de la densidad del plasma que se fundaba en la intensidad observada de rayos X exige conocer el grado medio de amontonamiento de las regiones emisoras, porque los medios continuos y los apelotonados emiten radiación con rendimientos ligeramente diferentes. En el caso exclusivo de que el medio intergaláctico sea altamente uniforme resultará su densidad deducida igual a la densidad crítica. Aunque no hay forma directa de medir el grado de amontonamiento, un medio continuo parece improbable desde el punto de vista teórico: la mayoría de los componentes del universo, por ejemplo la materia luminosa en las galaxias, evidencian una distribución muy alejada de la uniformidad.

Una tercera razón de incertidumbre en la conclusión de que un medio caliente intergaláctico mantenga ligado el universo es quizá la más profunda de todas ellas: carecemos de pruebas directas que demuestren que la radiación X difusa de fondo se deba a tal plasma caliente y no a otro mecanismo distinto de aquél. Por desgracia, la emisión de rayos X no lleva el marchamo de su origen como bremsstrahlung de un gas diluido. Hay, además, otros procesos conocidos de laboratorio capaces de generar la emisión de rayos X. Una explicación de la emisión de rayos X de fondo en términos de un plasma caliente concuerda con las observaciones actuales y hasta quizá sea elegante. Pero ¿es la única? Dada la importancia cosmológica de la existencia del plasma, al menos si se encuentra cerca de la densidad crítica, uno tiene derecho a pedir algo más que una explicación concordante. Quedaríamos más tranquilos, por ejemplo, sabiendo que las restantes explicaciones sobre la emisión de radiación X de fondo no concuerdan con los datos.

Pero no ocurre así. Hay una explicación alternativa que no se funda, para nada, en la existencia de un medio intergaláctico. Esta explicación rival de la radiación de fondo ha venido recibiendo creciente atención por parte de los investigadores a lo largo de los últimos años. La observación de que la radiación X de fondo ofrece una elevada isotropía es una afirmación no sólo de una característica de la fuente de la radiación, sino también del grado de finura de la instrumentación disponible. Considérese la posibilidad de un gran número de objetos discretos, cada uno de los cuales emita rayos X. Si los objetos estuvieran lejos del observador y fueran suficientemente numerosos, de suerte que cada región del cielo albergara una cantidad nutrida de los mismos, el observador podría interpretar erróneamente esas fuentes discretas como un resplandor difuso y uniforme. Con independencia de cuán refinado fuera el instrumento, siempre habría una densidad hipotética de objetos en el cielo tal que el instrumento no podría resolverla como fuentes discretas y determinar, por tanto, que se trataba de un conjunto de puntos bajo observación y no de un medio difuso.

¿Proviene la radiación X difusa de una fuente realmente difusa? ¿Se origina acaso en múltiples emisores de rayos X distantes y diferenciados, sin relación alguna con un gas intergaláctico enrarecido? Un primer paso a dar para decidir sobre esta cuestión será preguntarse por la existencia de algún constituyente conocido del universo que sea, a la vez, muy corriente y poderoso emisor de rayos X. Las galaxias, material de construcción básico del universo, no satisfacen los requisitos. Aunque muy numerosas, no emiten suficiente radiación X para que su suma corresponda a la intensidad observada de radiación X de fondo.

Esta conclusión es, a su vez, una consecuencia de la conclusión original a la que se llegó después de la primera observación de rayos X procedentes del Sol: las estrellas normales no emiten una fracción substancial de su energía en forma de rayos X. Por tanto, la suma de las emisiones de rayos X procedentes de todas las estrellas que integran una galaxia es todavía débil comparada con su emisión en el visible. He mencionado ya un segundo componente del universo y fuente vigorosa de rayos X: el gas de los cúmulos ricos en galaxias. A primera vista, diríase que esa fuente constituye una posibilidad prometedora, ya que hay bastantes cúmulos de galaxias. Pero recientes observaciones de la emisión de rayos X procedente de cúmulos cercanos, junto con una estima de su densidad en otras partes del universo, tienden a indicar que esas aglomeraciones de galaxias aportarían, como máximo, un bajo porcentaje de la radiación X difusa de fondo.

En los últimos tres años, los registros de rayos X realizados por el Observatorio Einstein, un satélite orbital, han revelado otro poderoso candidato para la fuente de radiación X de fondo: los objetos cuasi-estelares, o quásares, son intensas fuentes de emisión de rayos X. La naturaleza exacta de los quásares es todavía un enigma. En las fotografías ópticas aparecen como puntos, indiscernibles de las estrellas normales de la galaxia. Pero hace veinte años ya se apreció que, a diferencia de las estrellas normales, muchos de esos objetos de morfología estelar eran intensas fuentes de radioondas.

Los estudios de la emisión óptica de los quásares, instados por esta observación, descubrieron muy pronto que se están alejando de la Tierra a enormes velocidades, en algunos casos más del 90 por ciento de la velocidad de la luz. Si se atribuyen esas velocidades de alejamiento a la expansión general del universo, que determina también el distanciamiento de las galaxias exteriores (punto éste aceptado por la mayoría, aunque no por todos los investigadores), uno se ve obligado a concluir que los quásares no son estrellas de nuestra galaxia, sino que nos hallamos ante los objetos observables más distantes del universo. Los ejemplos más alejados se encuentran mucho más allá de las galaxias conocidas más remotas; la luz que emiten inició su camino poco después de la gran explosión. Pese a las prodigiosas distancias a que se hallan esos objetos, muchos brillan lo suficiente para que se les pueda observar con un sencillo telescopio de aficionado. Significa ello que la luminosidad intrínseca de los quásares es enorme, muy supe-

rior a la de las galaxias normales, y resulta improbable que su mecanismo generador de energía se parezca a la fusión termonuclear que la suministra a las estrellas normales.

Un examen de muestras cuidadosamente seleccionadas de objetos débiles en placas fotográficas ha revelado que, aunque pocos quásares están cercanos a nuestra galaxia, se trata de un componente bastante común del universo remoto. Al parecer, algún efecto surgido en la evolución de los últimos miles de millones de años ha extinguido, en gran parte, el fenómeno quásar.

Se sabía, antes del lanzamiento del Observatorio Einstein, que una gavilla de quásares muy próximos eran fuentes de radiación X muy vigorosas; así lo habían mostrado las observaciones de cohetes y satélites anteriores. En los casos más extremos, un solo quásar genera, en las longitudes de onda de los rayos X, mil veces la energía que alcanza la emitida en forma de luz visible por los 100.000 millones de estrellas de nuestra galaxia. Mas, por causa de esa inmensa lejanía de la mayoría de los quásares, tan abrumadora emisión de energía llega muy débil a la Tierra; hasta el punto de que la mayoría de los quásares escapaban a la observación de rayos X antes del lanzamiento del Einstein.

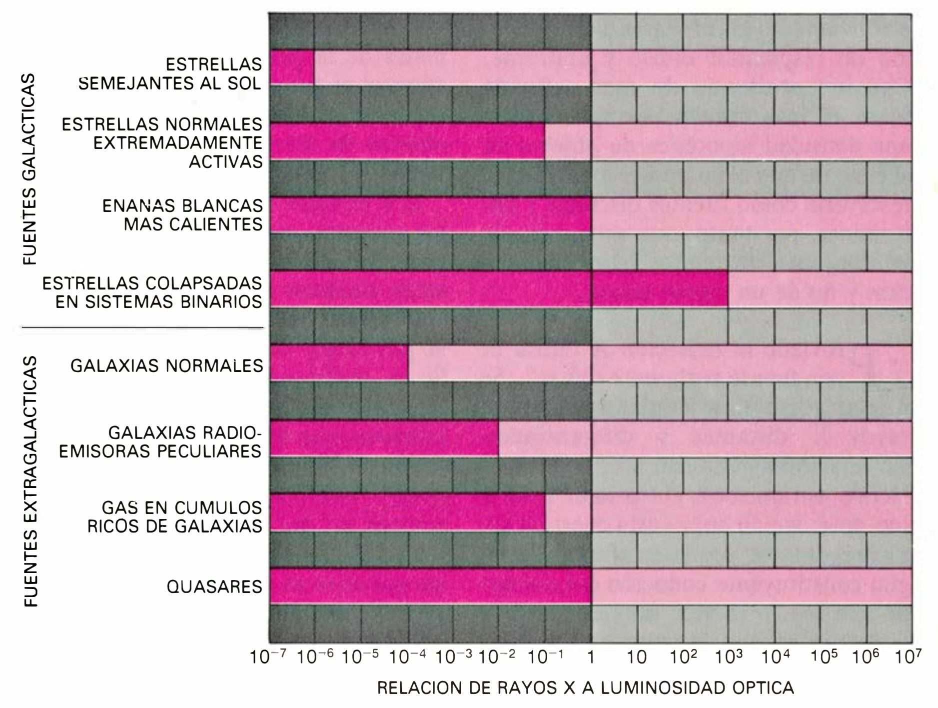
El satélite Einstein detectaba rayos X con una sensibilidad que multiplicaba por mil la alcanzada en los proyectos anteriores. Comparado con los anteriores detectores del tipo contador de Geiger, que a duras penas se hacían con una tosca idea de las intensidades, el Einstein llevaba un nuevo sistema de focalización, capaz de formar imágenes de rayos X; éstas se transmitían a la Tierra digitalizadas. A lo largo de los dos años de la vida del satélite, se le ordenó transmitir imágenes de rayos X de múltiples objetos de interés, incluidos varios cientos de quásares. La mayoría de los así observados resultaron potentes fuentes de radiación X.

Tenemos, por un lado, esas observaciones de rayos X de una muestra limitada de quásares; por otro, la información aportada por los estudios ópticos, más completos, del número total de quásares por área del cielo. En principio, estamos capacitados, pues, para estimar la contribución de los quásares a la radiación X difusa de fondo. Y al hacerlo, llegamos a la fascinante conclusión de que una elevada proporción, si no la totalidad, de la radiación X de fondo se debe a quásares distantes que, uno a uno, resultan invisibles. Como ocurre con cualquier exploración que se basa en una pequeña fracción de la población para extrapolar luego las propiedades a un grupo mucho más vasto, existen en ella importantes puntos sin contestar.

En el caso de la exploración del Observatorio Einstein de los quásares emisores de rayos X, las dificultades se entremezclan. En primer lugar, los datos ópticos en los que se confiaba para deducir el número de quásares por unidad de área de cielo son todavía objeto de controversia; datos que son cruciales para ligar la emisividad en rayos X de la pequeña muestra de objetos observada con una estima de la contribución total del conjunto de objetos. En segundo lugar, como los astrónomos saben desde su mismo descubrimiento, los quásares tienen propiedades que parecen evolucionar a lo largo de la duración de la vida del universo. La información suministrada por los rayos X proporciona también una indicación provisional de la evolución de las propiedades de los quásares relacionadas con los rayos X en función del tiempo. Según los investigadores del Centro de Astrofísica del Observatorio del Harvard College y del Observatorio Astrofísico Smithsoniano, el cociente de la emisión de rayos X a la emisión en luz visible de los quásares que ellos observaron parece depender de una o más propiedades distintas, entre ellas, quizá, la distancia a que se encuentran de nuestra galaxia.

Las pruebas de tal evolución en las propiedades de los rayos X son deprimentes; cualquiera que sea la contribución que los quásares aporten a la radiación X de fondo, debe originarse como una mezcla de emisiones de esos extraños objetos en todo el universo y en una gran variedad de diferentes estados de evolución. Por tanto, debe conocerse con precisión la naturaleza exacta del proceso evolutivo para calcular qué contribución hay que asignar a los quásares en la radiación de fondo. (El problema es análogo al de calcular el interés compuesto de una cuenta bancaria. Si se conoce el capital inicial y el interés, es fácil predecir el balance en cualquier instante dado. Si se supone, sin embargo, un interés ligeramente diferente, el balance predicho será muy distinto.)

El último problema con que se tropieza, a la vista de los datos disponi-



6. LA MAYORIA DE LOS OBJETOS ASTRONOMICOS generan sólo una pequeña fracción de su emisión total de radiación en las longitudes de onda de rayos X. Si hay que atribuir la radiación X de fondo a múltiples fuentes singulares remotísimas, los objetos deben ser unos poderosos emisores de rayos X y, además, bastante corrientes para justificar la isotropía observada. Como estas barras indican, resulta difícil satisfacer esa última condición: los emisores potentes de rayos X tienden también a ser objetos bastante exóticos. Las estrellas cuya relación de rayos X a la luz visible es la unidad o superior escasean tanto que la suma de la emisión en rayos X procedente de una galaxia normal es típicamente de sólo una diezmilésima parte (10^{-4}) de su emisión en luz visible. De aquí que las galaxias normales, aunque numerosas, no pueden contribuir apreciablemente a la radiación X difusa de fondo. El plasma caliente aprisionado en los cúmulos ricos de galaxias sí genera abundancia de rayos X, pero tales cúmulos son demasiado raros para dar cuenta de más de un pequeño porcentaje de la radiación X de fondo. Los quásares son los objetos que más se aproximan a la combinación requerida de propiedades: copiosa emisión en rayos X y abundancia de tales objetos cuasi-estelares a grandes distancias de la Tierra. (Ilustración de Ilil Arbel.)

bles, resulta familiar a estadísticos y encargados de censos: ¿Hasta qué punto es normal el corto segmento de la población escogida para la encuesta? Al Observatorio Einstein se le ordenó apuntar a quásares descubiertos a lo largo de los últimos años en razón de su extrema luminosidad en su emisión visible y en su emisión de radio; estos objetos representan la inmensa mayoría de los quásares conocidos. La pregunta es la siguiente: ¿Darán tales objetos una idea no tendenciosa de las propiedades de los quásares en el dominio de los rayos X?

Al comienzo del programa Einstein, no quedaba, evidentemente, otra alternativa que observar los quásares catalogados. Pero la destacada sensibilidad que poseían los detectores de rayos X del Einstein ofreció, diríase que de una forma inesperada, otra posibilidad. Consistía la observación típica en orientar el satélite de tal manera que el objeto astronómico de interés cayera en el centro de la imagen focalizada de rayos X antes del comienzo de la exposición. Lo mismo que con cualquier otra cámara, parte de la zona circundante, no relacionada con el objeto en cuestión, quedaba incluida en la imagen. Al examinar esas imágenes de rayos X, se puso de manifiesto que una elevada proporción de los registros mostraba una o varias fuentes adicionales débiles de rayos X en los bordes, sin relación alguna con el objeto original de la toma. Estas fuentes de rayos X recién descubiertas se han venido a llamar las fuentes Einstein fortuitas, a causa de la naturaleza accidental e inesperada de su hallazgo.

El número de fuentes fortuitas que tienden a acumularse en una imagen Einstein depende de la magnitud de la exposición a los rayos X. Este descubrimiento apoya sólidamente la hipótesis según la cual si las fuentes puntuales de cualquier tipo contribuyen apreciablemente a la radiación X difusa de fondo, entonces las fuentes fortuitas serán, probablemente, representativas de la población. Dicho de otra manera, las fuentes fortuitas aparecen en los datos de manera imprevisible y sin la intervención o el conocimiento del observador; constituyen el ideal de lo que un profesional de la estadística piensa que habría de ser una muestra verdaderamente representativa.

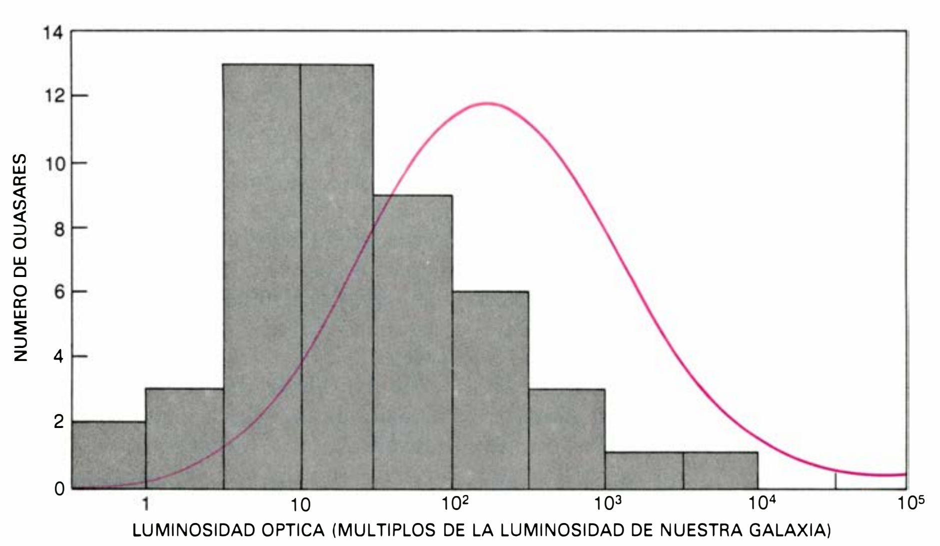
¿Cuál es la naturaleza de las fuentes fortuitas? En particular, ¿corresponden a otros objetos ya bien estudiados, mediante métodos ópticos, por ejemplo? ¿Son acaso una clase enteramente distinta de componentes del universo? La pregunta no tiene fácil respuesta. La limitada capacidad de focalización que caracteriza a la óptica de rayos X da por resultado imágenes que, juzgadas con las normas de la astronomía óptica, son bastante borrosas. Así como es difícil medir con precisión los rasgos de una imagen borrosa en una fotografía tomada con luz visible, lo es también asignar una posición exacta en el cielo a cada una de las fuentes fortuitas de rayos X. Para salvar el escollo, se fija una pequeña región, de un diámetro aproximado de una trigésima parte de grado, de cuyo interior se estima que emanan los rayos X. Esta precisión no es suficiente para identificar el objeto inequívocamente con una fuente visible conocida; una fotografía con luz visible de la misma región del cielo donde se originan los rayos X mostrará entre cuatro y seis débiles objetos; cualquiera de ellos (o ninguno) podría corresponder a la fuente de rayos X.

Necesitamos más observaciones para conocer la naturaleza de las fuentes fortuitas de rayos X y determinar si tienen relación con el problema de la radiación X difusa de fondo. Varios grupos de investigadores han acometido esas observaciones. Formaban uno Gary A. Chanan, de la Universidad de Columbia, Ronald A. Downes, de la Universidad de California en Los Angeles, y el autor. Nuestra técnica ha consistido en examinar fotografías ordinarias con luz visible de la pequeña región del cielo que corresponde a la región de incertidumbre posicional de cada una de las fuentes fortuitas. Como he indicado, este método suele producir un grupo restringido de débiles objetos candidatos a la contrapartida en luz visible de la fuente de rayos X. Examinamos esos objetos visibles en busca de alguna propiedad anómala. (Téngase en cuenta que las estrellas normales raramente son fuentes detectables de rayos X.) La luminosidad de los candidatos nos llega 100.000 veces debilitada; resulta imposible contemplarlos a simple vista; se necesitan, pues, grandes telescopios. Trabajamos principalmente con el reflector de 2,1 metros del Observatorio Nacional de Kitt Peak, el telescopio Shane de tres metros del Observatorio Lick y el reflector de cuatro metros del Observatorio Interamericano de Cerro Tololo en Chile.

Nuestra técnica se basa en la espectroscopía: separación de la radiación en sus longitudes de onda componentes. Los espectrogramas de las estrellas normales tienen huecos en longitudes de onda características, donde átomos fríos de las capas exteriores de la estrella han absorbido la luz antes de que ésta pudiera llegar al detector. Los espectros que obtuvimos de casi todos los objetos estelares cercanos a la posición de la fuente fortuita de rayos X presentaban estas características familiares; al parecer, todos esos objetos son estrellas normales, bastante cercanas y sin nada que ver con la fuente de rayos X.

En la región distinguíamos, en la mayoría de los casos, otro objeto cuyo espectro difería radicalmente; ofrecía un conjunto discreto de longitudes de onda donde había un exceso de radiación. Este aspecto de las características de emisión, opuesto a las características de absorción que se encuentran en las estrellas normales, nos revela que se trata de un objeto rarísimo, dotado de una copiosa cantidad de gas caliente. Además, las longitudes de onda precisas en las que aparecen las características de emisión corresponden a las de átomos familiares, tales como el hidrógeno, helio y carbono, pero con un fuerte y sistemático corrimiento de la longitud de onda hacia el extremo rojo del espectro. El corrimiento hacia el rojo indica que la fuente de luz se está alejando del observador. Esta peculiar combinación de características espectrales –fuertes rayas de emisión corridas hacia el rojo y asociadas a elementos químicos comunes– constituye la firma de un quásar. Con otros varios grupos que trabajan en el problema, hemos encontrado que una considerable proporción de las fuentes fortuitas de rayos X son en realidad quásares hasta entonces desconocidos.

El descubrimiento tiene profundas implicaciones respecto al origen de la radiación X difusa de fondo y, en particular, con respecto a aquellas interpretaciones en las que la radiación de fondo se atribuye a un conjunto de fuentes puntuales distantes. Si uno mira a través una niebla y apenas discierne la naturaleza del más brillante de entre un gran número de objetos distantes que se pierden en la bruma, parece razonable suponer que una proporción elevada de la población más distante, inobservables uno a uno, esté constituida por objetos semejantes. De manera análoga, la identificación de un gran número de fuentes fortuitas de rayos X con los quásares (se conocen unos 150 casos) constituye una señal valiosa de que los quásares son responsables de una apreciable fracción de la radiación de fondo.



7. CINCUENTA Y UN QUASARES se representan en este diagrama de barras. Fueron descubiertos por el autor y sus colegas como contrapartidas ópticas de fuentes fortuitas de rayos X que aparecen en imágenes registradas por el Observatorio Einstein. La representación se ha hecho en términos de la emisión visible de cada uno. Antes de este trabajo, la inmensa mayoría de los quásares conocidos se habían descubierto merced a su desusada emisión óptica o de radio, no por su emisión en rayos X. La curva en color manifiesta la distribución de la luminosidad óptica para una muestra representativa de 51 quásares seleccionados ópticamente y mediante su radioemisión. La técnica de rayos X selecciona quásares con una luminosidad óptica menor que la de los seleccionados por los antiguos métodos. La diferencia de luminosidad entre los seleccionados mediante rayos X y los hasta entonces descubiertos permite deducir la radiación X de un quásar típico y determinar el cupo con que contribuyen a esa radiación de fondo.

¿Qué tamaño tiene esa fracción? ¿Son los quásares el contribuyente predominante a la radiación de fondo, resolviendo así el problema del origen de esta radiación planteado hace 20 años? ¿Se trata tal vez de una aportación simbólica, un contaminante en pequeña dosis de un fondo debido, por el contrario, a un plasma intergaláctico caliente? No podemos estimar cuánto medio intergaláctico caliente existe (si lo hay), sin introducir la intensidad de los rayos X de fondo; lo que aboga por una posibilidad real de que ambos tipos de fuentes contribuyan a la radiación X de fondo observada.

Las propiedades del conjunto de quásares descubiertos accidentalmente encierran la clave de la solución del problema. Un estudio de las propiedades de los objetos de esta muestra, los primeros quásares descubiertos por su emisión en rayos X y no por su emisión visible o en radio, aportará una visión nueva, y quizá también más independiente, de las propiedades en rayos X de tan enigmáticos objetos. La comparación de las propiedades de la muestra elegida mediante rayos X con muestras previas, seleccionadas ópticamente o mediante radio, revela interesantes diferencias. La cantidad intrínseca de energía luminosa emitida por la muestra seleccionada mediante rayos X parece ser sistemática y significativamente menor, alrededor de una décima parte, que la magnitud correspondiente al conjunto de los quásares hasta entonces conocidos.

Pero carecemos todavía de una interpretación cabal de esa diferencia. Algunos investigadores arguyen que el conjunto de todos los quásares tiene un amplio dominio de posibles luminosidades en rayos X y luz visible. Las exploraciones ópticas encontrarían, entonces, los objetos más conspicuos en luz visible, dotados de características en rayos X que podríamos suponer normales; las exploraciones mediante rayos X encontrarían exactamente lo contrario. De donde se sigue que la comparación entre las dos muestras revelaría propiedades significativamente diferentes, lo que de hecho se observa. Por otra parte, algunos de los efectos de evolución citados arriba podrían anular, de un modo preferente, la emisión X de un subconjunto de quásares y dar de nuevo lugar a propiedades distintas para las muestras seleccionadas por rayos X u ópticamente. Lo que es peor, uno y otro efecto podrían adquirir importancia a la vez.

Los posibles efectos evolutivos constituyen un auténtico contratiempo. Aunque cualquier radiación isótropa puede nacer de la suma de componentes situados a diversas distancias del observador, puede mostrarse que la contribución dominante es la debida a los objetos más alejados. Si las propiedades de los objetos evolucionan y cambian con la distancia, los más remotos y debilitados, para los cuales los datos disponibles son también los más inseguros, nada impide que difieran de los objetos próximos y brillantes. Para el último grupo, los datos pueden ser buenos, pero no genuinos de la población que interesa. Este efecto no deja de tener importancia a algún nivel, para los quásares emisores de rayos X. Ni siquiera la refinada sensibilidad del detector Einstein bastaba para examinar los objetos que podían ser responsables del grueso de la radiación X de fondo, admitido que los quásares se erigieran en fuente principal de ésta. Hay que extrapolar, por tanto, las propiedades de los quásares seleccionados mediante rayos X y así evaluar la contribución total de esos objetos a la radiación de fondo. No se conoce todavía la finura de las extrapolaciones. Según sea la naturaleza precisa del método, podremos concluir que los quásares constituyen el componente dominante de la radiación de fondo o que sólo aportan una proporción despreciable.

Aunque los quásares emisores de rayos X descubiertos accidentalmente arrojan nueva luz sobre la contribución de esos objetos exóticos a la radiación de fondo, la interpretación exacta de las nuevas aportaciones es compleja y, por ahora, ambigua. Como suele ocurrir en astronomía observacional, un gran aumento de la sensibilidad no sólo ha traído consigo nuevas respuestas, sino que también ha abierto nuevos interrogantes. ¿Existen indicaciones independientes que ayuden a separar la contribución de los quásares a la radiación X de fondo de la parte debida al plasma intergaláctico? Un camino sería el de determinar el espectro de la radiación observada: ¿Cuánta radiación X se detecta a cada longitud de onda en comparación con las longitudes de onda vecinas? Esta técnica constituye, en principio, una poderosa herramienta de diagnóstico, porque los procesos físicos fundamentales que generan rayos X suelen dar por resultado espectros distintos e identificables.

Las técnicas experimentales que requiere la espectroscopía a las longitudes de onda de rayos X encierran una dificultad mayor que las correspondientes en longitudes de onda de luz visible. Pese a ello, los instrumentos transportados por satélites han establecido el espectro de la radiación X de fondo con creciente exactitud a lo largo de los últimos años. El grueso de ese trabajo lo ha realizado un grupo del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA). Estos

investigadores señalaron que el espectro observado de la radiación de fondo se parecía mucho al que correspondería al bremsstrahlung de un plasma caliente a una temperatura de unos 500 millones de grados Kelvin. El resultado se considera un importante punto a favor de la postura según la cual la contribución del plasma caliente domina en la radiación X de fondo, siendo muy pequeña la contribución de los quásares (o de cualquier fuente distante y discreta). Pero, una vez más, la complejidad inherente a la interpretación del resultado resta solidez a la conclusión.

Veamos una de esas dificultades implicadas: qué espectro podría esperarse si un conjunto de quásares, y no un gas caliente, originara la mayor parte de la radiación de fondo. En ese caso, el espectro sería la suma de los espectros individuales de una multitud de objetos. Los espectros de rayos X se han determinado uno a uno para un número exiguo de quásares brillantes; no se parecen especialmente al espectro de la radiación de fondo. Quizás el espectro de rayos X de los quásares distantes difiera del espectro de los quásares próximos, por la razón repetidamente aducida de los efectos evolutivos. Además, el espectro de la radiación difusa de fondo se determina, con suma precisión, en un dominio de longitudes de onda ligeramente distinto de la longitud de onda en la que se hicieron las imágenes del Einstein. Si la naturaleza, maliciosamente, cambiara el mecanismo de emisión responsable del grueso de la radiación de un régimen o el otro, los investigadores que se concentrasen en observaciones de producción de imágenes podrían estar de hecho, y sin saberlo, tratando de resolver dos problemas ligeramente diferentes.

Hay una medición accesible, razonablemente libre de ambigüedad, que nos ayuda a distinguir entre la contribución a la radiación X de fondo aportada por fuentes discretas y distantes de rayos X, por un lado, y la proporción con que contribuye un plasma caliente, por otro. Cuanto mayor sea el tiempo de exposición obtenido por el Observatorio Einstein, mayor será el número de fuentes fortuitas de rayos X detectadas. Por tanto, la fracción de la contribución a los rayos X representada por esas fuentes discretas respecto al número total de rayos X que se recoge en la imagen completa constituye un cálculo, por defecto, de la fracción de la radiación de fondo debida a tales fuentes discretas. Para la máxima exposición, esta fracción se cifra en torno a una cuarta parte. Los objetos tales como los quásares proporcionan una contribución apreciable a la radiación de fondo. Esta medida, sin embargo, queda muy por debajo del límite del 50 por ciento, cuando se podría decir con alguna confianza que los objetos discretos serían responsables de la contribución dominante a la radiación de fondo, lo que en esencia resolvería el problema.

Tras este repaso, debería quedar claro que un instrumento para la formación de imágenes en rayos X más potente que los transportados por el Observatorio Einstein está capacitado para resolver la cuestión de una manera directa y elegante, con sólo resolver un número suficiente de fuentes débiles que dé cuenta de la mitad o más de la emisión total en cualquier mancha restringida del cielo, o descubriendo, por el contrario, que, a niveles muy bajos de brillo de rayos X, la radiación permanece difusa y no se divide en fuentes separadas. La tecnología requerida está a nuestro alcance. La NASA ha propuesto un instrumento de la potencia adecuada para su transporte a bordo de un satélite. El desarrollo de este proyecto, conocido como Instalación Astrofísica Avanzada de Rayos X (AXAF), requeriría unos 10 años tras la aprobación del presupuesto. Un comité de astrónomos encabezado por George B. Field, de la Universidad de Harvard, preparó recientemente una lista de prioridades para el próximo decenio de investigación astronómica; en la lista figuraba AXAF en primer lugar.

En este momento, no sabemos si estudios ulteriores de las fuentes de rayos X descubiertas accidentalmente posibilitarán la comprensión, con exactitud razonable, de los efectos de la evolución de los quásares. Tal conocimiento, junto con datos ópticos más afinados del número de quásares que típicamente se encuentra en pequeñas regiones del cielo, podría conducir a un cálculo preciso de la importancia de los quásares respecto a la radiación de fondo y, por implicación, a estimar la contribución del plasma caliente intergaláctico. Los datos ópticos de mayor sensibilidad necesarios vendrán suministrados, casi con toda seguridad, por el Telescopio Espacial, cuya puesta en órbita ocurrirá en 1985. Bien entonces, o bien a principios del decenio de 1990, con el lanzamiento del satélite AXAF, llegaremos, por fin, a conocer con seguridad si la radiación difusa X de fondo y los quásares, ambos descubiertos independientemente hace veinte años, son o no dos manifestaciones diferentes del mismo fenómeno.



Inicios de la agricultura en la Península Ibérica

Alrededor del año 5000 antes de Cristo aparecen en la Península los primeros agricultores y pastores. La actividad económica de estos grupos y su compleja cultura material hablan de intensas relaciones en el Mediterráneo occidental

Bernardo Martí Oliver

Desde nuestro contexto cultural, la agricultura y la ganadería constituyen el modo natural de obtener los alimentos. Sin embargo, la existencia de comunidades de cazadores y recolectores en diversas partes de la tierra nos demuestra que las maneras de armonizar las necesidades sociales y las disponibilidades del entorno físico, en orden a obtener los recursos necesarios para la subsistencia de un grupo humano, ofrecen una gran diversidad, como diversas son las estructuras sociales, las cosmogonías o los ambientes sobre los que se asientan las comunidades humanas.

De hecho, el trabajo de la tierra y la domesticación de los animales fueron actividades ajenas a los grupos humanos que vivieron durante el Paleolítico y el Mesolítico, lo que supone la mayor parte del tiempo que el hombre lleva sobre la tierra. Sólo hace aproximadamente diez mil años, algunos grupos humanos iniciaron las transformaciones que conducirían a este nuevo modo de vida. El Neolítico se refiere a las culturas prehistóricas que adoptaron la nueva actividad, y decir proceso de neolitización equivale a proceso de cambio desde una economía basada en la caza de los animales salvajes y en la recolección de los vegetales silvestres hacia una economía agrícola y ganadera.

Fue John Lubbock, en 1865, quien primero estableció la diferenciación entre el Paleolítico y el Neolítico, dentro de la Edad de la Piedra, basándose en unos criterios de orden tecnológico y cronológico: el Neolítico se caracterizaba por la aparición de nuevos útiles fabricados mediante el pulimento de la piedra y su desarrollo correspondía ya a los tiempos actuales desde el punto de vista geológico.

Desde estos criterios iniciales, que permitieron la necesaria división de los tiempos prehistóricos, se ha recorrido un largo camino hasta llegar a los modelos actuales en los que el proceso de neolitización no se reduce a innovaciones como la cerámica o el pulimento de la piedra. Hoy, el concepto de neolitización se extiende también, y fundamentalmente, al cambio económico que significa la adopción de la agricultura y de la ganadería, y a las notables repercusiones que ello tendría sobre la estructura social, la progresiva sedentarización y el aumento del tamaño de los grupos humanos.

Como se comprende fácilmente, ello implica un proceso de gran complejidad y hace que, con frecuencia, para expresar la importancia de los cambios y las diferencias que separan a las sociedades preneolíticas y posneolíticas, hablemos de la "revolución neolítica" de acuerdo con las ideas expuestas por Vere Gordon Childe a partir de 1925. Debe tenerse en cuenta, no obstante, que la transformación de un grupo humano nómada, recolector y cazador, en otro sedentario y dedicado a la producción de alimentos, requiere una larga evolución. De ahí que la visión actual de la "revolución neolítica" tienda a eliminar toda connotación de cambio repentino, de súbito estallido de la agricultura en los valles de los grandes ríos, de comunidades especialmente dotadas que inventan un nuevo modo de procurarse el alimento.

Si hace cincuenta años se concebía la agricultura como un sistema revolucionario de obtención de alimentos que habría aparecido en un único lugar y se habría difundido posteriormente por todas las tierras, dadas las innegables ventajas que su adopción representaría para las comunidades cazadoras y recolectoras, los estudios recientes conducen a planteamientos más matizados. La agricultura no es ni una invención, ni un descubrimiento revolucionario. La transición a la producción de alimentos fue un proceso gradual y no hubo un cambio repentino desde una existencia miserable a la estabilidad y seguridad de los recursos alimenticios. Sin negar que una economía preagrícola opera generalmente bajo serias restricciones, la evidencia proporcionada por el estudio de los yacimientos paleolíticos y por los modernos cazadores-recolectores indica que puede conseguirse normalmente una buena acomodación entre medios y necesidades, siempre que partamos del principio de que la economía es una parte de la cultura y que, en definitiva, como señala Marshall Shalins, es la cultura quien define las necesidades más allá de la estricta esfera de la supervivencia. Si bien en las economías de caza y recolección la cantidad de alimentos disponible puede sufrir fuertes variaciones de acuerdo con los ritmos estacionales, o de uno a otro año, los grupos humanos que las practican pueden elegir incluso una relativa sedentarización a condición de estabilizar su demografía en los niveles mínimos señalados por el medio y por su tecnología, o pueden sobrepasar estos niveles bien desplazándose hacia otros ambientes más favorables, bien emprendiendo el camino de la neolitización.

No hay duda, sin embargo, de que la

1. INDUSTRIA DE SILEX característica de los inicios del Neolítico. El instrumental pertenece a la Cova de la Sarsa, sita en Bocairent, en Valencia. La primera fila de arriba y los dos primeros de la segunda empezando por la izquierda son perforadores o taladros; los restantes de esa fila y los dos minúsculos situados en el centro derecha, microlitos de forma trapezoidal; los cuatro siguientes, elementos de hoz; la postrera fila son hojas retocadas o con señales de uso. Aproximadamente a cuatro tercios de su tamaño.

agricultura y la ganadería una vez adquiridas plenamente por las comunidades humanas posibilitan la aparición de grandes poblados y su consiguiente corolario de jerarquización social, especialización artesanal, comercio y relaciones exteriores, etcétera, en un grado desconocido con anterioridad. En aquellas zonas donde esto ocurre se concentrará una población creciente y llegarán a constituir núcleos cuya influencia podremos rastrear en áreas muy alejadas al estudiar los materiales arqueológicos. Se producirán, pues, intensos procesos de difusión que serán causa de la aparición de comunidades neolíticas en otras partes. Tal es el caso de la Península Ibérica, a la que llegarán las influencias de las comunidades neolíticas del Próximo Oriente, tras reflejarse ampliamente en el Mediterráneo oriental y ser matizadas y reelaboradas en el ámbito del Mediterráneo occidental. Estas influencias explicarán la súbita aparición de las comunidades de agricultores y pastores con una nueva y compleja cultura material.

Pero, aunque para la Península Ibérica el último horizonte de referencia en la explicación de su neolitización sea el Próximo Oriente, no hemos de pensar que el desarrollo de la agricultura y de la ganadería corresponde a una única y privilegiada zona de nuestro planeta. Por el contrario, el mismo proceso tuvo lugar de manera independiente en áreas muy alejadas entre sí, con distintos matices y cronologías. En los inicios del cuarto milenio antes de Cristo ya se cultivaba el maíz en el valle de Tehuacán, en el México central; también en los altiplanos de los Andes del Perú aparecen entonces los primeros cultivos y una domesticación importante que afecta a las llamas, alpacas, patos y otros animales; en diversas partes del Asia oriental parece atestiguado el cultivo del arroz en el sexto milenio antes de Cristo; en el Sahara central y meridional, a lo largo de los milenios séptimo y sexto, cuando todavía los lagos saharianos poseían una considerable extensión y los uadis tenían agua abundante, se encuentran numerosos objetos destinados a moler granos, excesivos quizá para vegetales espontáneos. Por lo que se refiere al Próximo y Medio Oriente, donde se ha estudiado con más intensidad el proceso de neolitización, desde el octavo milenio antes de Cristo el cultivo del trigo y de la cebada, y la cría de los animales, junto a la recolección y la caza, constituyen la base alimenticia de granes poblados como el de Jericó en Palestina.

En la Península Ibérica las evidencias proporcionadas por la excavación y estudio de los yacimientos arqueológicos indican que es en torno al año 5000 antes de Cristo, mientras siguen viviendo y evolucionando las comunidades cazadoras y recolectoras del Mesolítico, cuando aparecen los primeros grupos de agricultores y pastores en la vertiente mediterránea y en la mitad meridional de la fachada atlántica peninsular. En este ámbito y a partir de tales fechas, numerosos yacimientos arqueológicos, en su mayor parte cuevas, muestran una nueva cultura material que comprende recipientes cerámicos, cucharas y anillos de hueso, brazaletes y hachas de piedra pulida, así como otros muchos elementos desconocidos hasta entonces, y, sobre todo, restos de cereales cultivados y de animales domésticos. Tal es el caso, por ejemplo, de la Cova de l'Or (Beniarrés), en cuya excavación se recuperaron abundantes semillas de trigo y cebada cultivados, que fueron fechadas por el método del carbono 14 en 4315 más-menos 75 y 4560 más-menos 160 años antes de Cristo, y numerosos huesos de animales domésticos como la oveja, la cabra, el cerdo y el buey.

Así pues, dos grupos muy diferenciados según su actividad económica y su cultura material se reparten nuestros yacimientos en los comienzos del quinto milenio antes de Cristo. De una parte, aquellos que constituyen el substrato humano anterior: las comunidades cazadoras-recolectoras del Mesolítico que poco a poco irán incorporando nuevos elementos neolíticos como la cerámica, y también la domesticación de los animales. De otra, y sin que medien en nuestros yacimientos los testimonios de una evolución previa, las comunidades de pastores y agricultores en posesión de una cultura material desconocida hasta entonces en la Península Ibérica.

El hecho de que falten en la Península Ibérica los pasos previos que conducen a esta plena cultura neolítica, es decir, que no veamos reflejada en nuestros yacimientos la progresiva adquisición de la agricultura y de la ganadería, como tampoco de la cerámica o del pulimento de la piedra, plantea el problema de los orígenes de estas comunidades o, al menos, los orígenes de las influencias que motivaron su aparición. Por otra parte, dado que al mismo tiempo que éstas se desarrollan comprobamos que las comunidades cazadoras-recolectoras del Mesolítico continúan su evolución iniciada en momentos anteriores, sin que se altere radicalmente su modo de vida ni su cultura material, hemos de pensar que no es en ellas, al menos exclusivamente, donde debemos buscar tales orígenes.

Durante mucho tiempo se argumentó que el Mesolítico, desarrollado en los tiempos post-pleistocénicos, tras el final de las glaciaciones, había sido una época de crisis profunda para la humanidad motivada por la falta de adaptación a las nuevas condiciones climatológicas y consiguientes cambios del medio ambiente animal y vegetal. Desde esta perspectiva, la revolución neolítica venía a significar el final de la crisis y el relanzamiento del progreso de la humanidad que superaba las dificultades no sólo mejorando su adaptación sino incluso transformando este medio ambiente animal y vegetal con el concurso de la ganadería y de la agricultura. Hoy, sin embargo, el estudio de los yacimientos mesolíticos da poco margen



2. COVA DE L'OR, uno de los yacimientos neolíticos más ricos del Mediterráneo occidental. No deja de ser sorprendente que los grupos neolíticos de la Península Ibérica, que habían alcanzado una cultura material muy elaborada, siguieran habitando en las cuevas como sus antecesores mesolíticos. Los poblados y asentamientos importantes al aire libre no aparecen aquí hasta comienzos del tercer milenio a. C. Zona de la cueva, bajo una linterna natural, en la que se llevan a cabo las excavaciones arqueológicas.

de confianza a estas interpretaciones de signo catastrofista. La continua evolución de las industrias mesolíticas nos demuestra que siempre existió una adaptación creciente a las nuevas condiciones ecológicas y una progresión tecnológica continua. Y así sucede en los yacimientos peninsulares, como ha puesto de relieve Javier Fortea, en los que comprobamos que su evolución no se interrumpió con la aparición de los pastores-agricultores neolíticos, sino que se prolongó al menos durante todo el quinto milenio, convergiendo muy lentamente hacia los nuevos modos de vida.

No ha de extrañar, pues, que ante esta dualidad de comunidades mesolíticas y neolíticas, resulte inevitable plantear la existencia de influencias externas para explicar los inicios de la agricultura y de la ganadería en el ámbito peninsular.

Ello ha sido, por otra parte, una constante de nuestros estudios prehistóricos. Posibles paralelos de nuestras culturas neolíticas con el Mediterráneo oriental fueron expuestos ya por Luis Siret a finales del siglo XIX y, a lo largo de la primera mitad del presente siglo, son continuas las referencias al continente africano que podemos ver en las obras de Pedro Bosch Gimpera, Luis Pericot, Julio Martínez Santa Olalla y otros. Las transformaciones profundas que supone el Neolítico equivalían a fuertes impulsos nacidos en el exterior y transmitidos hasta nuestras tierras mediante diversos procesos de difusión, singularmente mediante migraciones humanas. Hasta los años cincuenta el punto de partida inmediato fue Africa aunque, paradójicamente, se sabía muy poco de la evolución de las culturas prehistóricas norte-africanas. Paulatinamente, a medida que avanza el estudio de la prehistoria, se impone el abandono de estas tesis que serán sustituidas por influencias nacidas en el ámbito del Mediterráneo oriental y transmitidas mediante un proceso de difusión marítimo.

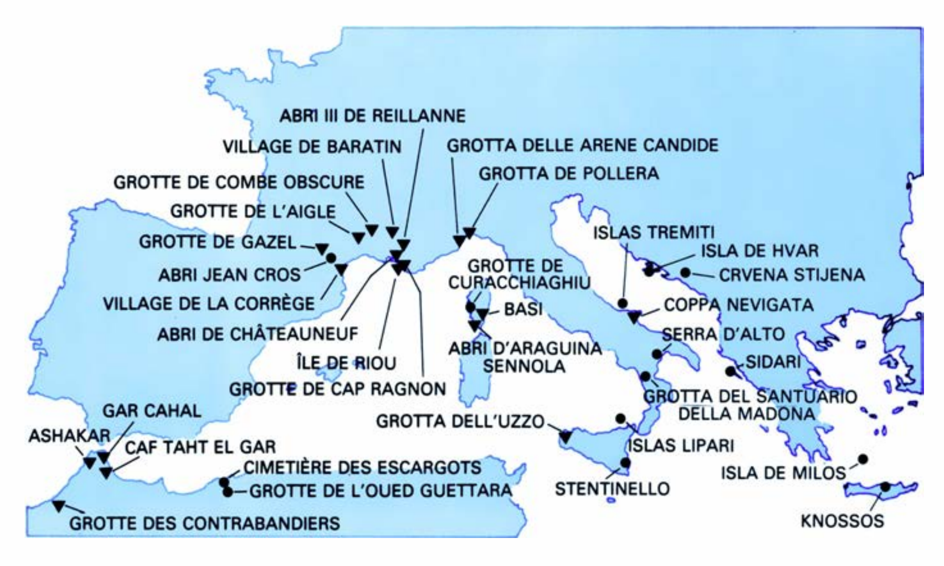
A este nuevo planteamiento contribuyeron de manera decisiva los trabajos realizados por Luigi Bernabo Brea en la cueva ligur de Arene Candide, en torno a 1950, y su estudio de conjunto sobre el Mediterráneo occidental en el que mostraba cómo las cerámicas con decoración impresa cardial, que caracterizan el primer nivel neolítico de Arene Candide, se encuentran en toda la cuenca mediterránea occidental correspondiendo siempre, en los yacimientos con estratigrafía conocida, al nivel neolítico más antiguo.



3. SON NUMEROSOS LOS YACIMIENTOS PENINSULARES que contienen materiales del Neolítico inicial. El mapa recoge aquellos donde se ha encontrado cerámicas de decoración impresa cardial (▼).

El origen de este Neolítico, que en adelante pasará a denominarse de las cerámicas impresas cardiales, debería buscarse en el Próximo Oriente, donde se documenta una neolitización muy anterior en el tiempo que incluye la aparición de la cerámica en general, y algunos tipos de ella en particular, susceptibles de ser considerados como sus antecesores. No parecía verosímil una propagación terrestre desde la zona sirio-anatólica al norte de Africa porque falta esta cultura con cerámica impresa en Egipto. Por ello, el Neolítico norteafricano sólo podría relacionarse con el sirio-anatólico a través de una difusión marítima mediterránea y, si ello fuera, no habría ninguna razón para que no hubiera llegado en el mismo tiempo a la costa italiana meridional, a Sicilia, Liguria, Provenza o a las costas de la Península Ibérica.

En efecto, desde mediados del sexto milenio antes de Cristo, según las dataciones absolutas obtenidas por el método del carbono 14, y sobre todo a partir del año 5000 aproximadamente, encontramos las primeras cerámicas en las costas del mar Adriático, en las del Tirreno, especialmente en la Liguria, en las costas del sur de Francia, del norte de Africa, así como en el litoral mediterráneo de la Península Ibérica y en la parte meridional de su fachada atlántica. Estas primeras cerámicas, diseminadas por todo el ámbito del Medite-



4. LAS PRIMERAS CULTURAS NEOLITICAS del Mediterráneo occidental reciben el nombre de culturas de las cerámicas impresas, por ser ese tipo de manufacturas el que la caracteriza. Esta decoración se realizaba antes de la cocción de los recipientes cerámicos mediante la impresión de diversos instrumentos, singularmente del borde de una concha de una almeja *Cardium edule*, de donde deriva el nombre.

rráneo occidental, coinciden con las huellas más antiguas de la domesticación de los animales y del cultivo de los cereales; por ello, las primeras culturas neolíticas del Mediterráneo occidental reciben el nombre de Culturas de las Cerámicas Impresas, atendiendo a la característica decoración de estos recipientes cerámicos, realizada antes de su cocción mediante la impresión de diversos instrumentos, singularmente del borde de una concha de *Cardium edule*, razón por la que también se denominan cerámicas impresas cardiales.

Esta asociación de los inicios de la economía de producción con nuevos elementos de la cultura material, como la cerámica, a la vez que ésta irrumpe en nuestros yacimientos con un notable grado de perfección, contrasta con lo observado en otras áreas, como el Próximo Oriente, al tiempo que aporta nuevos indicios para un planteamiento de influencias externas.

En efecto, a diferencia de lo que sucede en nuestras tierras, en el Próximo Oriente la cerámica se revela como algo muy secundario en el proceso de neolitización. Mientras desde la mitad del octavo milenio antes de Cristo el cultivo de los cereales y la domesticación de los animales constituyen la base alimenticia de grandes poblados, la cerámica no aparece hasta mucho tiempo después: alrededor del año 7000 en el montículo de Gandareh, en los montes Zagros; a finales del séptimo milenio en el poblado de Çatal Hüyük, en la parte meridional de Anatolia; a principios del sexto milenio en la costa de Siria, Líbano y Palestina. Si miramos más hacia occidente vemos cómo en Grecia, aunque con una menor antigüedad, se encuentran también restos de culturas neolíticas pre-cerámicas en la Tesalia y en la Argólida y, lo que tiene mayor importancia para nosotros ahora, en la isla de Creta, donde el yacimiento de Knossos, con sus casas rectangulares de piedra y adobe, muestra la existencia del cultivo de los cereales y de animales domésticos como la cabra, la oveja, el cerdo y el buey, alrededor del año 6000 antes de Cristo. El caso de Knossos revela, pues, que a finales del séptimo milenio existía ya un cierto desarrollo de la navegación en un medio tan favorable como el que representan la cadena de islas del mar Egeo; lo que viene corroborado por la obsidiana de la isla de Milos que se encuentra a partir de estas fechas en Creta y el continente.

El panorama es ciertamente distinto cuando llegamos al Mediterráneo occidental, dentro del cual se inscriben nuestras culturas neolíticas y en el que no encontramos ya esta lenta evolución que representan las culturas neolíticas pre-cerámicas del Próximo Oriente. Sin embargo, todo ello no tendría la suficiente fuerza explicativa si no fuera por las evidencias que aportan las plantas y los animales domésticos, verdaderos sujetos pacientes del proceso neolitizador. Así, al igual que sucede en el Próximo Oriente, los primeros cultivos de la Península Ibérica se centran fundamentalmente en el trigo y en la cebada, y los primeros animales domésticos son la cabra, la oveja, el cerdo y el buey.







5. DIVERSOS OBJETOS DE HUESO. A la izquierda, cucharas halladas en la Cova de l'Or; en un caso se observa la denticulación del mango en la zona próxima a la pala. La fotografía superior de la derecha muestra varios tipos de anillos, algunos de los cuales presentan una bella decoración incisa, hallados también en la Cova de l'Or. De la Cova de la Sarsa son los punzones de hueso de la fotografía inferior de la derecha; fabricados sobre metapodios de ovicápridos que, dada su fragilidad, debieron ser agujas para adornar el cabello; en los tres fragmentos de la derecha se observa una decoración incisa.

Pues bien, resulta lógico suponer que para no necesitar recurrir a influencias exteriores es condición necesaria que tales especies animales y vegetales se den naturalmente en un medio ambiente determinado. Pero, hasta el momento presente, los estudios paleontológicos y paleobotánicos muestran la carencia en el ámbito del Mediterráneo occidental de los antecedentes silvestres del trigo y la cebada cultivados, así como de la oveja doméstica.

De este modo, resulta imposible, en el estado actual de la investigación, plantear la neolitización de nuestras tierras como resultado de una evolución autónoma de las poblaciones mesolíticas locales. El problema a estudiar ha de consistir, pues, en la valoración de esas innegables influencias externas, en el modelo de su difusión y en el consiguiente proceso de aculturación.

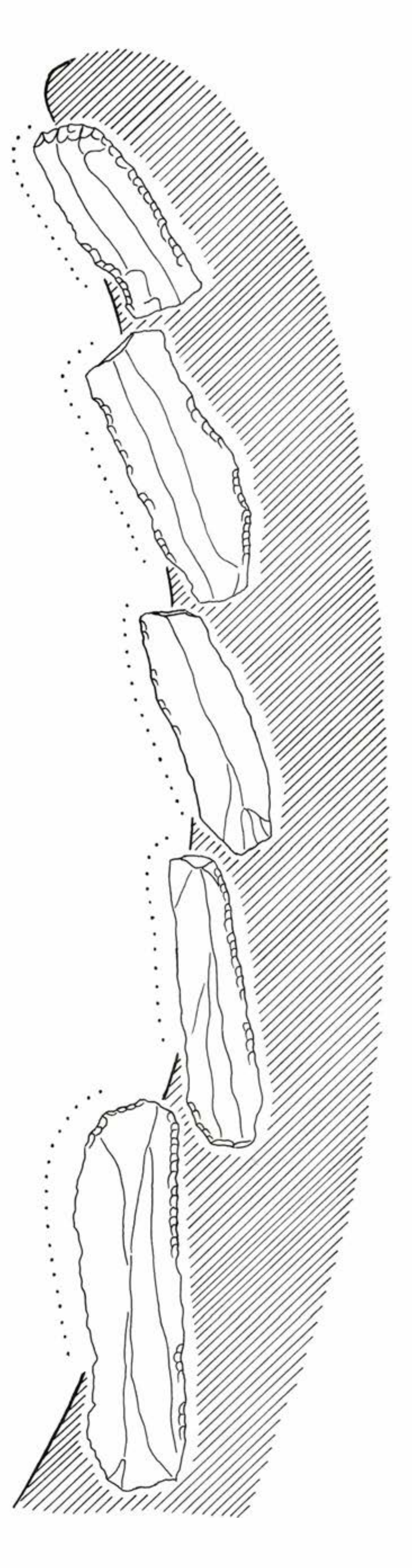
Es aquí donde incide y se justifica la importancia que venimos atribuyendo a las cerámicas del Neolítico inicial del Mediterráneo occidental. Porque la amplia distribución de una técnica decorativa tan particular, como es la impresión del borde de una concha sobre la pasta blanda del vaso, prueba inequívocamente la comunicación que existió entre partes muy alejadas de esta zona. Y, así, las cerámicas con decoración impresa cardial aparecen en lugares tan distantes como, por ejemplo, el yacimiento de Coppa Nevigata en las costas del mar Adriático, la cueva de Arene Candide en la Liguria, el abrigo de Châteauneuf en la Provenza, las cuevas de Montserrat en Cataluña, la cueva de la Sarsa en el País Valenciano, la cueva de la Carigüela en Andalucía, los yacimientos de los alrededores de Figueira da Foz en la costa atlántica peninsular o la cueva de Gar Cahal en el litoral norteafricano cerca de Ceuta.

Esta amplia distribución conduce, por último, al problema de la navegación. Hemos señalado cómo desde los momentos finales del séptimo milenio antes de Cristo queda atestiguada una cierta navegación en el Mediterráneo oriental, a través de ejemplos como el de Knossos, en la isla de Creta; o de la obsidiana que, procedente de la isla de Milos según revelan los análisis, encontramos en niveles neolíticos antiguos de la Grecia continental y en la misma isla de Creta. Pues bien, aunque con una cronología decreciente las evidencias de la navegación siguen hacia occidente y el poblamiento de las islas a lo largo de los milenios sexto y quinto resulta suficientemente elocuente: el yacimiento de Sidari en la isla de Corfú; los yacimientos neolíticos con cerámicas impresas de la isla de Hvar, en la costa dálmata; de las islas Tremiti; de las islas Lípari, cuya obsidiana aparece tanto en Sicilia como en la Península Italiana; de las islas de Córcega y Cerdeña; y, en momentos posteriores, de la isla de Mallorca, cuyo poblamiento podría remontarse a la transición entre el quinto y cuarto milenios antes de Cristo, según las dataciones de radiocarbono.

De todo ello podemos deducir que el proceso de neolitización del Mediterráneo occidental fue lento y laborioso, pero extraordinariamente más rápido que en zonas nucleares como el Próximo Oriente. Mientras allí la transición contempla períodos de tiempo que superan largamente el milenio, aquí hemos de pensar en cambios paulatinos a nivel de generaciones humanas pero que quizá sólo necesitaron de escasos centenares de años. Y a ello debemos atribuir el que en nuestros yacimientos no se nos muestre el proceso de neolitización de estos grupos con cerámicas impresas cardiales que, por el contrario, aparecen como culturas plenamente constituidas.

A la hora de plantearnos el origen y desarrollo de estos grupos neolíticos no sólo debemos tener en cuenta el substrato humano anterior, sino también los estímulos o contactos exteriores que gravitan sobre el Mediterráneo occidental y, muy especialmente, las conexiones internas, los importantes procesos de difusión y comunicación dentro de esta zona, que podemos suponer ligados al desarrollo de la navegación más como manifestación que como causa.

Así pues, los primeros grupos humanos que nos han dejado pruebas inequívocas de su economía productora, lo que los prehistoriadores denominan Neolítico inicial o antiguo, aparecen en la vertiente mediterránea de la Península Ibérica en torno al año 5000 antes de Cristo. La presencia de granos de cereales cultivados, de útiles agrícolas como las hoces de sílex o las azuelas de piedra pulida, de abundantes restos de animales domésticos, no permiten albergar dudas sobre cuál fue la principal actividad de estas comunidades que, por otra parte, poseen una cultura material desconocida con anterioridad. Los recipientes de cerámica, entre los que destacan los decorados mediante las impresiones cardiales; las cucharas o los anillos de hueso; los variados tipos de cuentas de collar, colgantes y brazaletes, tienen muy poco que ver con lo que caracteriza a los grupos mesolíticos cazadores-recolectores.



6. RECONSTRUCCION DE UNA HOZ neolítica, basada en el estudio de las partes activas de algunos de los elementos de hoz encontrados en el yacimiento de la Cova de la Sarsa. Los puntos señalan la parte de las hojas de sílex o elementos de hoz que presentan un fuerte brillo: lustre de cereales o pátina de siega. Tamaño ligeramente aumentado.

Los yacimientos peninsulares que contienen materiales del Neolítico inicial son numerosos. En Cataluña lo encontramos en las cuevas de Montserrat (Barcelona), cuyos ricos hallazgos de cerámicas impresas cardiales, publicados por Josep Colomines en 1925, pusieron de manifiesto la importancia de este tipo cerámico, razón por la que también se conoce como "cerámica montserratina"; en la Cova del Toll (Moià), en l'Esquerda de les Roques de El Pany (Torrelles de Foix), en la Cova Bonica (Vallirana), en la Cova de la Font Major (Espluga del Francolí), etc., y en los yacimientos al aire libre de Les Guixeres (Viloví) y Roc d'En Sardinyà (Sant Genís de Vilasar).

Hacia el interior de la península, la presencia de cerámicas impresas cardiales en la Cueva de Chaves (Bastaras), en el Alto Aragón, muestra una importante penetración.

Siguiendo hacia el sur continúan los hallazgos en el abrigo de Botiquería dels Moros (Mazaleón), en la Cova Fosca (Ares del Maestre), en la Cova de Can Ballester (Vall d'Uixó), hasta llegar al conjunto de yacimientos comprendidos entre los ríos Júcar y Segura, uno de los más numerosos y en el que se encuentran dos de los yacimientos más ricos del Mediterráneo occidental: la Cova de la Sarsa (Bocairent) y la Cova de l'Or (Beniarrés); a las que se suman otras como la del Forat de l'Aire Calent (Ròtova), la Coveta Emparetà (Bocairent), de les Cendres (Moraira), Cova Ampla del Montgó (Xàvia), de En Pardo (Planes), el yacimiento al aire libre de Casa de Lara (Villena), entre otros.

En Andalucía oriental este neolítico aparece bien representado en la importante Cueva de la Carigüela (Piñar), en la estación de superficie de Las Majolicas (Alfacar), en la Cueva de las Goteras (Mollina) y en la Cueva de los Murciélagos (Zuheros), si bien en este último caso la ocupación del yacimiento corresponde a momentos avanzados del quinto milenio como luego veremos. Finalmente, en la Andalucía occidental hallazgos recientes indican la existencia de este horizonte neolítico con cerámicas impresas cardiales, enlazando así con los yacimientos de la parte meridional de Portugal: los de la Ponta de Sagres, la Gruta do Escoural (Montemor-o-Novo), o los del área de Sines y de Figueira da Foz.

La variedad y cantidad de objetos recuperados en estos puntos permiten reconstruir con cierto detalle su cultura material y actividad económica.

Al igual que en los tiempos paleolíticos, el sílex sigue siendo una materia prima importante para la fabricación de útiles, a la que ahora se añade el pulimentado de rocas como el basalto, el pórfido y otras. La talla del sílex proporciona hojas y hojitas, que en muchos casos se utilizaron como elementos de hoz. Se trata de hojas que presentan un fuerte brillo en su filo, llamado "pátina de siega" o "lustre de cereales" por ser debido a su empleo en los trabajos de recolección de éstos; las primeras hoces prehistóricas estaban formadas por mangos de madera en los que se insertaban varias de tales hojas de sílex o elementos de hoz. También a partir de las hojas de sílex se fabrican perforadores o taladros, que presentan una punta o saliente muy marcado obtenido por retoques bilaterales de la hoja, y que debieron utilizarse para el trabajo de la madera y del hueso, así como para la realización de las perforaciones de lañado en los vasos cerámicos, lo que es una práctica muy extendida durante el Neolítico. En pequeño número existen microlitos geométricos de sílex, entre los que predominan los trapecios, algunos segmentos de círculo o medias lunas y triángulos; pequeñas piezas destinadas a insertarse en un mango, como los elementos de hoz, o en un astil al modo de los dientes de un arpón.

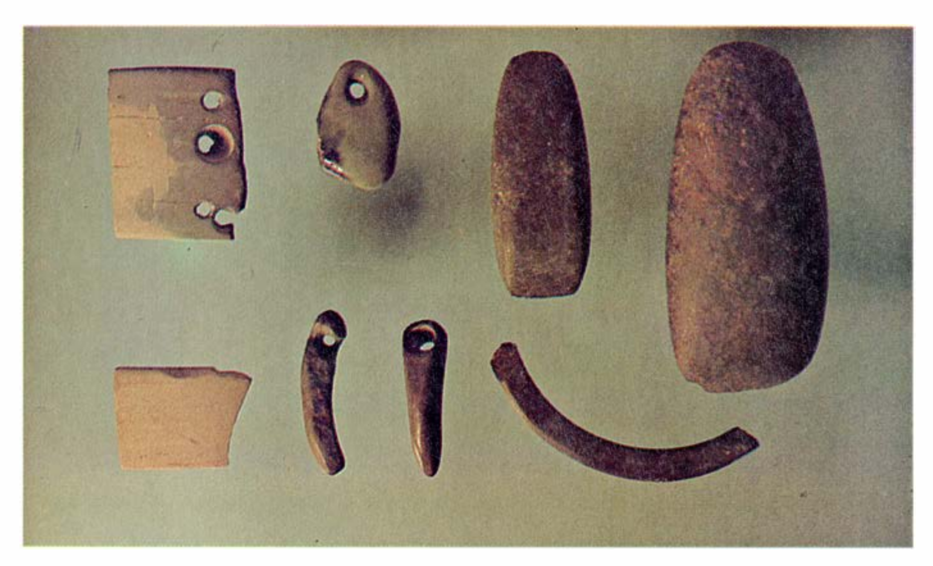
Mediante el pulimento de la piedra se obtienen hachas y azuelas, que podemos relacionar con actividades agrícolas o con la tala de árboles destinada a ganar espacio para el cultivo; y también pequeños cinceles y azuelitas que se emplearían en el trabajo de la madera.

Los materiales cerámicos forman un conjunto excepcional en el que aparecen las más diversas formas y decoraciones, aunque por las razones expuestas anteriormente se haya tendido a destacar los vasos con decoración impresa cardial. Además de ésta, encontramos impresiones de instrumentos dentados a modo de peines, decoraciones incisas, acanaladas, cordones, ungulaciones, digitaciones y pequeños mamelones. Las formas de los vasos son diversas: hemiesféricas, globulares con cuello, cubiletes de base plana, cucharones con mango, pequeñas botellas y toneletes; así como los elementos de aprehensión que comprenden asas de cinta, asas anulares, tubulares, mamelones; y las llamadas asas-pitorro, formadas por un pitón destinado a la salida del líquido, al modo de los botijos, y un puente que lo une a la pared del vaso. Es frecuente encontrar perforaciones de lañado en la cerámica, lo que es expresión de las dificultades encontradas por los artesanos neolíticos en su elaboración; estas perforaciones, que se encuentran siempre en número par flanqueando las grietas o roturas de los vasos, se unirían mediante fibras vegetales o tendones de animales.

Si la industria lítica nos lleva siempre a la consideración de los útiles, de la tecnología aplicada por el hombre para conseguir una mejora de sus relaciones con el medio ambiente que le permita apropiarse lo necesario para vivir, la cerámica nos aparta ligeramente de esta consideración por cuanto, más allá de su función como recipiente y de su importancia para la alimentación, dado que es el primer recipiente que permite ser colocado al fuego, el barroquismo de sus formas y decoraciones sobrepasa el concepto de lo utilitario y nos acerca a lo peculiar, a las creacio-



7. CEREALES CARBONIZADOS encontrados en el yacimiento de la Cova de l'Or. Muestras semejantes a ésta, una vez clasificadas, revelaron la existencia de distintas especies de trigo y de cebada, fechándose por el método del carbono 14 en 4315 y 4560 años antes de Cristo, lo que confirma su gran antigüedad.



8. UTILES Y ADORNOS DE PIEDRA PULIMENTADA, recuperados en la Cova de l'Or. El primero de ambas filas y el último de la inferior son fragmentos de brazaletes; los dos últimos de la fila superior, una hacha y una anzuela (ésta, mayor en la fotografía y parcialmente teñida de rojo); el resto son colgantes.

nes no determinadas por la esfera de la subsistencia. En este sentido, es frecuente encontrar recipientes cerámicos que conservan polvos de ocre en su interior, indicio de una utilización ligada a actividades decorativas, artísticas o al ornato personal.

Por otra parte, es característico del Neolítico inicial la proliferación de lo que podemos llamar elementos de adorno, como es el caso de las cuentas de collar, colgantes, anillos y brazaletes, fabricados sobre diversas materias primas como las conchas, el hueso o la piedra. En este mismo apartado hay que incluir los finos punzones de hueso que, presumiblemente, debieron emplearse como agujas para el cabello. La importancia que adquieren ahora estos elementos que podemos llamar suntuarios es claro exponente de la creciente complejidad social que representan estas comunidades.

Son muchos los detalles que pueden derivarse del análisis de estos materiales. Así, la frecuencia con que se emplean las conchas marinas como materia prima para la fabricación de colgantes y cuentas de collar, cuando no se utilizan directamente las conchas mediante una perforación de su ápice, apuntan la relación existente entre estas comunidades y las zonas costeras, de lo que son prueba igualmente la distribución general de los yacimientos y algunos casos en particular, como la Cova de les Cendres y la Cova Ampla de Montgó, inmediatas al mar.

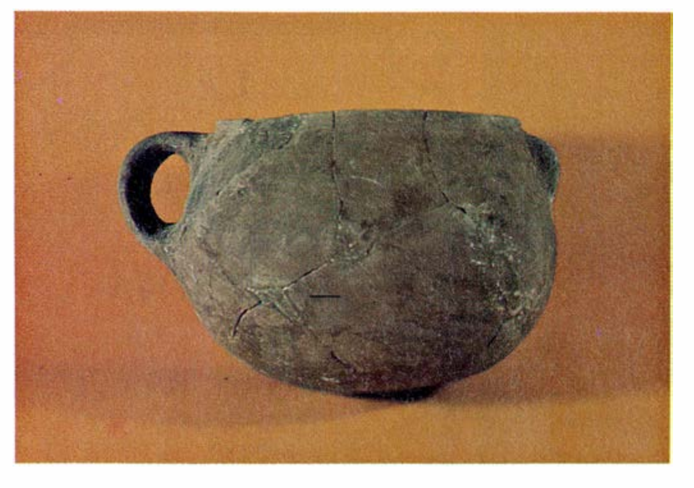
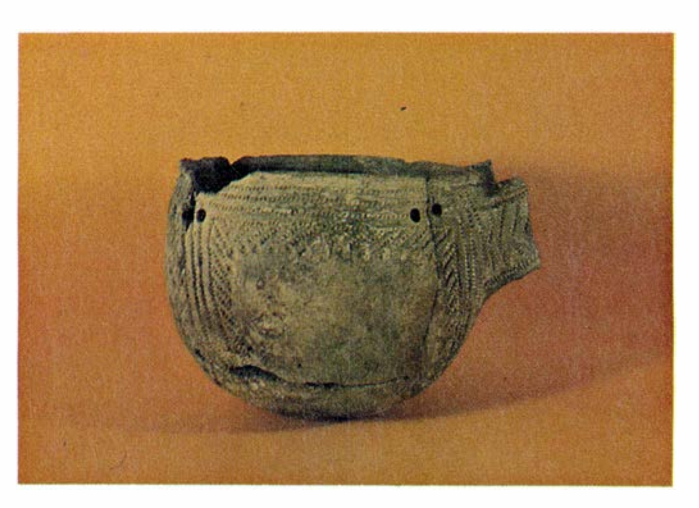
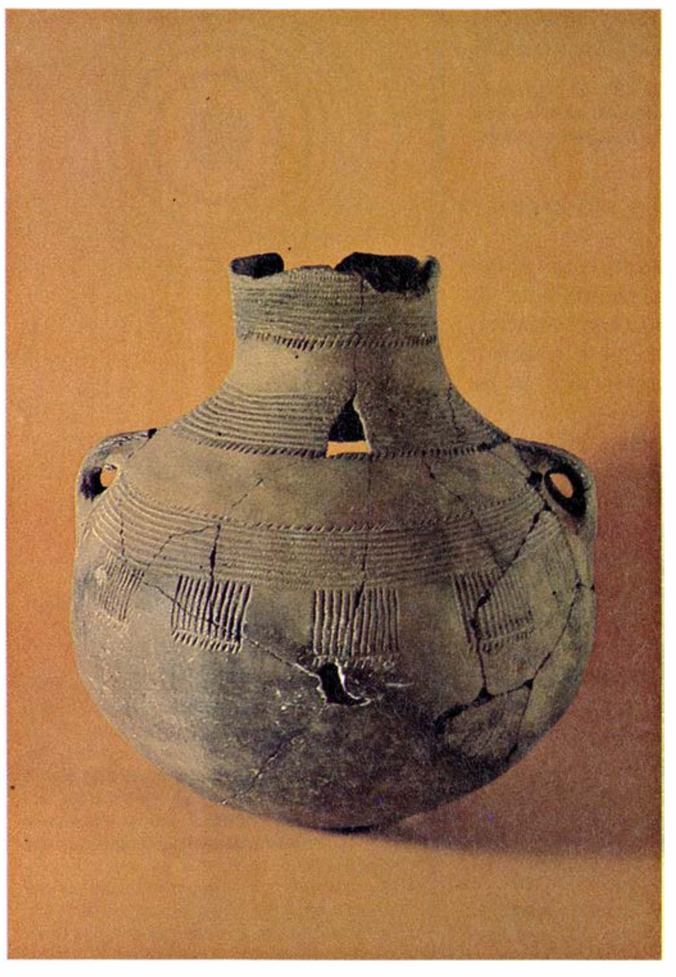
Las espátulas de hueso con el extremo dentado a modo de un pequeño peine y que fueron utilizadas, del mismo modo que las conchas de *Cardium*, para la decoración de los vasos cerámicos, demuestran que la fabricación de estos vasos tenía lugar en las proximidades de los asentamientos.

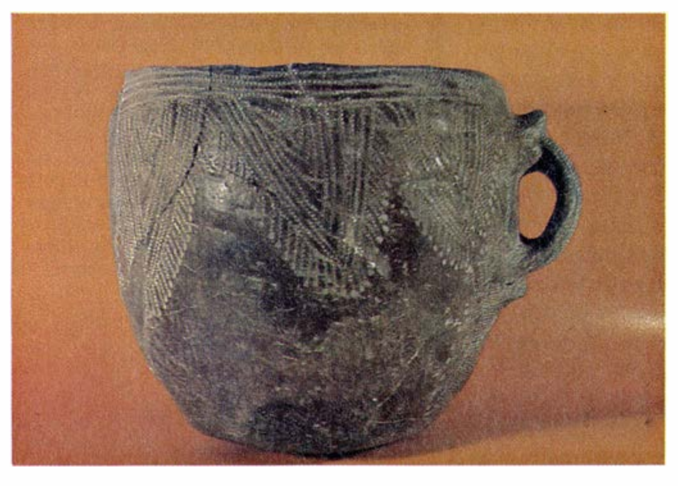
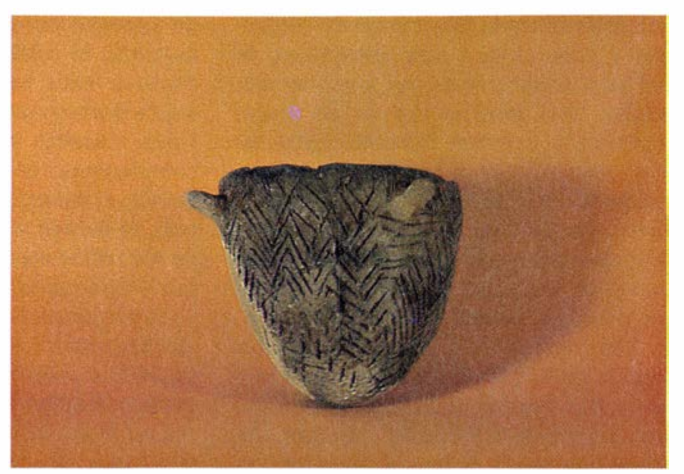
Las cucharas de hueso, que ahora aparecen por vez primera, unidas a las posibilidades que encierra la cerámica, nos hablan de la importante transformación de la dieta alimenticia, de las actividades culinarias.

Pero aunque todos estos materiales, considerados como característicos de nuestro primer Neolítico, denotan el cambio profundo que hubo de significar con respecto al Mesolítico, no debemos olvidar que el Neolítico representa sobre todo la aparición de la economía de producción. Y ello no sólo se desprende de la función de algunos útiles como los elementos de hoz, las hachas y azadas de piedra pulida, o las abundantes piedras de molino, sino que poseemos evidencias directas a través de las semillas y de los huesos de los animales conservados en los yacimientos.

Así, el estudio de los restos óseos de la Cova de l'Or, realizado por Manuel Pérez Ripoll, prueba la existencia de animales domésticos como la oveja, la cabra, el cerdo, el buey y el perro. Junto a ellos también se encuentran restos correspondientes a especies salvajes, cazadas por el hombre como complemento de su economía, como el ciervo, el corzo, la cabra montés, el jabalí, el conejo y otros. En el conjunto de los restos óseos de esta cueva la cabra y la oveja suponen más de la mitad y, en conjunto, los animales domésticos alcanzan unas tres cuartas partes del total; lo que es elocuente del grado de importancia adquirido por la ganadería.

Con respecto a la agricultura, refiriéndonos al mismo yacimiento, las abundantes semillas carbonizadas reve-

lan el cultivo de diversas especies de trigo como la escanda, la esprilla y el trigo común; así como de cebada vestida y desnuda. Estos granos debieron sufrir un proceso de tueste previo a su almacenamiento para asegurar su más larga conservación, lo que ha permitido que llegaran hasta nosotros. Junto a ellos no se encontraron trozos de espigas ni glumas sueltas, sino tan sólo algunas astillas de carbón vegetal, lo que nos indica que estaban completamente trillados. Todo ello prueba, según Maria Hopf, que en la Península Ibérica, desde los tempranos tiempos de las cerámicas impresas cardiales, no sólo se cultivaban cereales sino que eran ya conocidas las distintas variedades existentes en el Próximo Oriente.

En relación con estos cereales destaca su datación mediante el método del carbono 14, antes expuesta, que dio las fechas de 4315 ± 75 y 4560 ± 160 años antes de Cristo. Dataciones confirmadas por otras tres obtenidas sobre muestras de carbón, procedentes igualmente de la estratigrafía de la Cova de l'Or, con los resultados de 4770 ± 380, 4680 ± 290 y 4030 ± 290 años antes de Cristo; variando la antigüedad de estas muestras según su posición estratigráfica y correspondiendo las dos primeras a los niveles más profundos, los más ricos en cerámicas impresas cardiales.

También otros yacimientos han proporcionado pruebas inequívocas de agricultura y ganadería. Como la Cueva de los Murciélagos de Zuheros, cuyas fechas de carbono 14 van del 3980 ± 130 al 4300 ± 35 años antes de Cristo, y entre cuya cultura material destacan las cerámicas a la almagra, muy abundantes en los yacimientos andaluces. En esta cueva también se encontraron restos de cereales cultivados, predominando la escanda, el trigo común y la cebada desnuda. Entre los restos óseos destacan los de oveja y cabra domésticas, y en menor medida los del cerdo y el buey. Algunos animales salvajes presentes en escaso número, como el jabalí, la cabra montés y el conejo, conceden una pequeña importancia a la caza.

No deja de ser sorprendente que estos grupos neolíticos con una cultura material tan compleja sigan habitando en las cuevas. Es cierto que se conocen algunos asentamientos al aire libre, como hemos indicado al enumerar los principales yacimientos peninsulares, pero ni su número, ni las evidencias recuperadas en ellos, permiten atribuirles una importancia comparable con la de las cuevas. Esta es otra característica del Neolítico inicial de la Península Ibérica, en la que los poblados no aparecen hasta momentos mucho más tardíos, en los inicios del tercer milenio antes de Cristo. A partir de entonces las cuevas sólo serán frecuentadas esporádicamente y su utilización prioritaria será la de lugar de enterramiento, al menos en aquellas zonas donde el fenómeno megalítico no se produce o no adquiere un gran desarrollo. Por el contrario, durante el Neolítico inicial las cuevas seguirán siendo lugar de habitación y, ocasionalmente, también se enterrarán en ellas a los muertos, como sucede en la Cueva de la Sarsa.

Hemos de terminar refiriéndonos a las zonas no relacionadas directamente con el Mediterráneo y la fachada meriodional atlántica, en las que el proceso de neolitización es más tardío. Aquí sólo podemos contemplar el lento proceso seguido por el substrato mesolítico en contacto con las influencias emanadas de aquellos grupos neolíticos iniciales. En la parte central y el cuadrante noroccidental de la Península Ibérica, los trabajos sobre la neolitización han tenido un menor desarrollo y las líneas generales del proceso están más desdibujadas; en otros casos, como el País Vasco, excavaciones y estudios recientes han aportado luz a estas cuestiones. De manera general, la neolitización de estas zonas tendría su horizonte inicial en la transición de los milenios cuarto y tercero antes de Cristo, momentos en los que se producen grandes cambios en la Península coincidiendo con la aparición de los poblados y el desarrollo de las construcciones megalíticas, y antecediendo en pocos centenares de años a los inicios de la metalurgia.

9. TIPOS DE VASOS Y DECORACION NEOLITICA. Vemos, así, en la fila superior un primer vaso con amplia asa de cinta vertical y mamelón en la parte opuesta, carente de decoración (*izquierda*), seguido de otro (*derecha*) con asa de cinta horizontal y decoración impresa cardial, que muestra las incisiones del borde y del ápice de una concha y evidencia perforaciones de lañado a ambos lados de las grietas o roturas. En la segunda fila, un vaso dotado de dos pequeñas asas simétricas ofrece una rica decoración impresa obtenida por aplicación de un instrumento finamente dentado. De los dos pequeños vasos que aparecen a su derecha, el superior, con cuerpo globular y cuello, tiene dos asas asimétricas, una de ellas rota, y rica decoración impresa cardial; el inferior es un tonelete con las dos asas anulares situadas en el mismo lado y decoración impresa hecha mediante la aplicación de un peine o instrumento dentado similar, sobrela pasta blanda del vaso. En la fila inferior, vaso con asa de cinta que presenta un apéndice en la parte superior; porta también decoración impresa cardial (*izquierda*). A su derecha inmediata, vaso con tres mamelones en la parte superior, como elementos de aprehensión y decoración de líneas incisas.

Temas metamágicos

Frases víricas y estructuras lingüísticas autoduplicantes en el reino de las ideas

Douglas R. Hofstadter

Hace dos años, cuando traté por vez primera en esta sección el tema de las frases autoalusivas, recibí una avalancha de cartas de lectores intrigados por el fenómeno de la autoalusión en sus muchas diferentes concreciones. El año pasado di a conocer algunas de tales respuestas, desencadenando así una segunda oleada de correspondencia. Muchas de las cartas recibidas han contribuido a iluminar el problema de la autoalusión desde nuevos ángulos. Me gustaría describir aquí las ideas de algunas personas, comenzando con dos que respondieron a mi sección inicial con cartas notablemente similares: Stephen Walton, de Nueva York, y Donald R. Going, de Oxon Hill.

En opinión de ambos, las frases autoreproductivas pueden ser asimiladas a los virus. Son éstos entes minúsculos capaces de convertir en esclavos suyos a "anfitriones" mucho mayores y mucho más autónomos, logrando que éstos, ya por las buenas, ya por las malas, lleven a cabo una compleja secuencia de operaciones de replicación que engendran nuevos ejemplares del virus, los cuales, libres para abandonar al primer hospedante, pueden ahora esclavizar a otros. "Las frases víricas", nombre con que Walton las ha bautizado, "buscan la reproducción de sí mismas tomando el control de recursos pertenecientes a entidades más complejas".

Walton y Going quedaron muy impresionados por la perniciosa naturaleza de tales frases, por la egoísta forma con que invaden un espacio de ideas y se las arreglan, sin más que ir produciendo duplicados de sí mismas, para apoderarse de una gran porción de ese espacio. ¿Por qué no de *todo* el espacio? ¿Qué les impide infestarlo por completo? He aquí una buena pregunta. A los iniciados en teoría evolucionista, sin embargo, la respuesta puede parecerles obvia: la causa de que estas frases no consigan el dominio de todo el espacio es la competencia que les plantean otros autorreplicadores. Cierto tipo de replicador puede llegar a incautarse de una región de este espacio, y ser capaz de repeler eficazmente de él a sus rivales, excavando para sí un "nicho" en el espacio de ideas.

La noción recién expuesta de lucha por la supervivencia, del mismo carácter que la evolucionista, entre ideas autorreplicantes, no es original de Walton o de Going, si bien ambos tienen nuevas cosas que añadir. La primera referencia que yo tengo acerca de esta cuestión se encuentra en un párrafo del neurofisiólogo R. W. Sperry, en un artículo de 1965 titulado "Mind, Brain, and Humanist Values". Escribe Sperry: "Las ideas suscitan ideas y contribuyen a la evolución de nuevas ideas. Las ideas interactúan entre sí y con otras fuerzas mentales en el seno de un mismo cerebro, pero también lo hacen en cerebros vecinos, y hoy, gracias a las comunicaciones de alcance mundial, en cerebros extranjeros muy alejados. E interactúan también con el entorno externo, produciendo *in toto* un avance evolutivo, brusco como un estallido, de trascendencia mayor que cualquier otro fenómeno que haya podido manifestarse en el desarrollo de la evolución, incluida la aparición de la célula viva".

Poco después, en 1970, el biólogo Jacques Monod, especialista en biología molecular, publicó *El azar y la necesidad* (Barral Editores, Barcelona, 1971). En el último capítulo de su libro, Monod se expresaba así con respecto a la evolución en el campo de las ideas:

"Es tentador, para un biólogo, comparar la evolución de las ideas a la de la biosfera. Porque el Reino abstracto transciende la biosfera más aún que ésta al universo no vivo, las ideas han conservado algunas de las propiedades de los organismos. Como éstos, tienden a perpetuar su estructura y a multiplicarla, pueden fusionar, recombinar, segregar su contenido y, en fin, evolucionar, y en esta evolución la selección, sin ninguna duda, desempeña un gran papel. No me aventuraría a proponer una teoría de la selección de las ideas. Pero se puede al menos intentar definir algunos de los principales factores que intervienen. Esta selección debe necesariamente operar a dos niveles: el del espíritu y el de la *performance* (eficacia).

"El valor de *performance* de una idea depende de la modificación de comportamiento que aporta al individuo o al grupo que la adopta. Aquella que confiera al grupo humano que la hace suya más cohesión, ambición, confianza en sí, le dará de hecho un aumento de poder de expansión que asegurará la promoción de la idea misma. Este valor de promoción no tiene necesariamente relación con la parte de verdad objetiva que la idea pueda comportar. La poderosa armadura que para una sociedad constituye una ideología religiosa no es debida a su estructura misma, sino al hecho de que esta estructura es aceptada, que se impone. Por ello resulta muy difícil separar el poder de invasión de una idea como ésta y su poder de *performance*.

"El poder de invasión, en sí, es mucho más difícil de analizar. Digamos que depende de las estructuras preexistentes en el espíritu, entre las que se hallan las ideas ya encaminadas por la cultura pero también, sin ninguna duda, ciertas estructuras innatas que no son, por otra parte, muy difíciles de identificar. Pero se ve claramente que las ideas dotadas del más alto poder de invasión son las que *explican* el hombre asignándole su lugar en un destino inmanente, en cuyo seno se disuelve su angustia."

Monod utiliza la expresión "Reino abstracto" para referirse al universo de ideas, a lo que hace poco he llamado "espacio de ideas". Y puesto que lo retrata como pariente cercano de la biosfera, bien podríamos permitirnos llamarlo "ideosfera".

En 1976, Richard Dawkins, etólogo especializado en evolución, publicó *The Selfish Gene* ("El gen egoísta", Editorial Labor, Barcelona, 1979) en cuyo último capítulo se desarrolla más ampliamente esta idea. Dawkins llama "meme" a la unidad de replicación y selección en la ideosfera, equivalente al gen de la biosfera. Al igual que una biblioteca es una colección organizada de libros, una memoria es una colección organizada de memes. Y el caldo de cultivo en el que los memes crecen y florecen –similar al "caldo primordial" del que por vez primera rezumó la vida– es el caldo de la cultura humana. Escribe Dawkins:

"Ejemplos de memes son tonadas o sones, ideas o consignas, modas en

cuanto a vestimenta, formas de fabricar vasijas o de construir arcos. Al igual que los genes se propagan en el acervo de genes pasando de un cuerpo a otro a través de espermatozoides u óvulos, así los memes se propagan en el acervo de memes al saltar de un cerebro a otro a través de un proceso que, considerado en sentido amplio, puede llamarse de imitación. Si un científico escucha o lee una buena idea, la transmite a sus colegas y alumnos. La repite en sus artículos y clases. Si la idea se hace popular, puede decirse que se ha propagado, esparciéndose de cerebro en cerebro. Como mi colega N. K. Humphrey claramente lo resumió en un primer borrador de este capítulo: '... se debe considerar a los memes como estructuras vivientes, en un sentido técnico y no de pura metáfora. Cuando plantas un meme fértil en mi mente, parasitas, literalmente, mi cerebro, convirtiéndolo en vehículo de propagación del meme, de la misma forma que los virus parasitan el mecanismo genético de una célula anfitriona. Y ésta no es sólo una forma de expresarlo: el meme de "creer en la vida ultraterrena", pongamos por caso, se ha realizado físicamente, millones de veces, como una estructura del sistema nervioso de los hombres en la historia del mundo'.

"Consideremos la idea de Dios. Ignoramos cómo surgió en el acervo de memes. Probablemente brotó muchas veces mediante 'mutaciones' independientes. En todo caso es muy antigua. ¿Cómo se reproduce? A través de la palabra hablada o escrita, con ayuda de una música maravillosa y un arte admirable. ¿Por qué tiene un valor tan alto de supervivencia? Recordemos aquí que el 'valor de supervivencia' no significa valor para un gen en un acervo de genes, sino valor para un meme en un acervo de memes. Formulemos con mayor claridad la pregunta: ¿Qué hay en la idea de un dios que le da estabilidad y penetración en el medio cultural? El valor de supervivencia del meme dios en el acervo de memes resulta de su enorme atractivo psicológico. Aporta una respuesta superficialmente plausible a problemas profundos e inquietantes sobre la existencia. Sugiere que las injusticias de este mundo hallarán su compensación en el otro. Los 'brazos eternos' suplen nuestras propias insuficiencias; a semejanza del placebo de un médico, no es el menos eficaz por el hecho de ser imaginario. Estas son algunas de las razones de por qué la idea de Dios se copia tan prontamente por las sucesivas generaciones de cerebros. Dios existe, aun cuando sea en la forma de un meme de alto valor de supervivencia, o poder contagioso, en el medio ambiente elaborado por la cultura humana."

Dawkins tiene el mayor cuidado en subrayar que no es preciso que en el cerebro de cada persona haya una representación exacta de cada meme, escrito en un código memético universal. Los memes, como los genes, son susceptibles de variación o distorsión, en una palabra, de mutación. Las diversas mutaciones de un meme tendrán que competir entre sí y con los otros memes para recibir atención, es decir, recursos cerebrales manifestados en forma de tiempo y espacio a ellas dedicado. Los memes han de competir no sólo para adjudicarse recursos internos, sino también, puesto que son transmisibles visual y auricularmente, para apropiarse de espacio radiofónico y televisivo, de carteles en las calles, de columnas en diarios y revistas, de estantes de las bibliotecas. Más todavía, unos memes tenderán a desacreditar a otros, mientras que ciertos grupos de memes tenderán a ser internamente auto-reforzantes. Escribe Dawkins:

"Dientes, garras, intestinos, en trabada adecuación, así como órganos sensoriales, evolucionaron en el acervo génico de los carnívoros, mientras que otro juego de caracteres estables distintos emergía del acervo génico de los herbívoros. ¿Ocurre algo similar en los acervos de memes? ¿Acaso el meme dios se ha asociado con otros memes, de suerte que dicha asociación favorezca la supervivencia de cada gen participante? Quizá podríamos considerar una iglesia organizada, con su arquitectura, sus ritos, leyes, música, arte y tradición escrita, como un juego estable coadaptado de memes que se prestan mutuo soporte.

"Tomemos un ejemplo: un punto doctrinal que se ha mostrado muy eficaz a la hora de reforzar la observancia religiosa: la amenaza del fuego eterno. Muchos niños, y adultos incluso, creen que sufrirán espantosos tormentos después de la muerte si no obedecen las reglas que les dictan los sacerdotes. Se trata de una técnica de persuasión especialmente desagradable que provocó una fuerte angustia psicológica a lo largo de la Edad Media y perdura hoy. Pero posee una gran eficacia. Podría haber sido planeada deliberadamente por un clero maquiavélico experto en técnicas de profundo adoctrinamiento psicológico. Pero dudo de que los sacerdotes fueran tan astutos. Es mucho más probable que memes inconscientes asegurasen su propia supervivencia en virtud de aquellas mismas cualidades de seudocrueldad que despliegan los genes que tienen éxito. La idea del fuego infernal es, simplemente, *autoperpetuadora*, en razón de su profundo impacto psicológico propio. Se ha unido al meme dios, porque se refuerzan mutuamente y apoyan su respectiva supervivencia en el acervo de memes.

"Otro miembro del complejo religioso de memes se denomina fe. Significa confiar ciegamente, en ausencia de pruebas, incluso ante datos en contra... Nada es más letal para cierto tipo de memes que la tendencia a buscar pruebas demostrativas... El meme de una fe ciega asegura su persistencia por el simple recurso inconsciente de desalentar una investigación racional.

"La fe ciega puede justificar cualquier cosa. Si un hombre cree en un dios diferente, o aun si emplea un ritual distinto para adorar a un mismo dios, la fe ciega puede decretar que debe morir: en la cruz, en la pira, atravesado por la espada de cruzado, de un balazo en las calles de Beirut o por el estallido de una bomba en un bar de Belfast. Los memes de fe ciega tienen sus propios y despiadados medios para propagarse. Esto es así, ya se trate de fe ciega política, patriótica o religiosa."

Cuando medito acerca de los memes suelo descubrirme imaginando una efímera constelación de chispas saltando de cerebro en cerebro y gritando "¡Yo! ¡Yo!". Las cartas de Walton y Going reforzaron esta imagen en interesantes formas. Por ejemplo, Walton comienza con la más sencilla de las frases víricas imaginables: "¡Pronúnciame!" o "¡Cópiame!", y rápidamente pasa a examinar variantes más complejas, que buscan engatusarnos con promesas ("Tres deseos te concederé si me copias") o inducirnos con amenazas ("¡Pronúnciame, o te echaré una maldición!"), ninguna de las cuales, nos hace observar, es probable que cumpla su palabra. Evidentemente, como él señala, poco puede importar esto, al ser criterio definitivo de viabilidad su éxito en sobrevivir en el acervo de memes. Todo vale en el amor y en la guerra, y en la guerra es preciso incluir la eterna batalla por la supervivencia, tanto en la biosfera como en la ideosfera.

Qué duda cabe de que pocas personas de más de cinco años picarán con las ingenuas promesas o amenazas de estas frases. Empero, bastaría prenderles, aunque fuera con alfileres, la coletilla "en la otra vida" para conseguir que algunos cayeran en la trampa me-

mética. Walton hace notar que un artificio similar se utiliza en las típicas "cadenas postales" (o "textos víricos") que prometen prosperidad a quienes copien y propaguen fielmente el mensaje, y amenaza con la catástrofe a quienes dejen de hacerlo. ¿Recuerda usted la triste historia de Alberto Puig, quien recibió 5 millones de pesetas, y enseguida los perdió, por haber roto la cadena? ¿Y qué decir del lamentable caso del general Regüeldo, quien murió seis días después de recibir esta carta, por olvidarse de hacer circular esta oración, tras haber ganado 9 millones de pesetas en un negocio el día de la víspera? Cuesta un poco no dejarse embaucar por semejantes patrañas, a pesar de que arrojemos despectivos la carta a la papelera.

He descubierto que las expresiones "frase vírica" y "texto vírico" acuñadas por Walton son extraordinariamente pegadizas y expresivas –pequeños memes, en sí mismas– y considero decididamente que vale la pena reproducirlas por vía de imprenta al menos 700.000 veces, y quién sabe cuantas veces más por vía oral. El propio texto vírico de Walton, como puede ver el lector ante sus ojos, ha conseguido poner a su servicio los recursos de un poderoso anfitrión: todo un servicio de imprenta y distribución. Ha sido violentamente catapultado hacia delante y está ahora mismo –en el instante en que está leyendo usted esta frase vírica– propagándose incontroladamente a través de la ideosfera.

La correcta elección del huésped –de la vía de propagación– es en sí misma muestra significativa de la calidad de una entidad viral. Así expresa Walton esta idea: "Evidentemente, es de la mayor importancia quién sea el receptor. Un virus del mosaico del tabaco que ataque un cristal de sal no estará de suerte; y hay personas que apenas echan la vista encima a una de esas cartitas de corre la bola proceden a hacerlas trizas. Hasta cierto punto, todo original enviado a las editoriales para su publicación puede considerarse texto vírico, pues aunque no aluda explícitamente a ello, está buscando asegurar su reproducción por intermedio de un anfitrión idóneo; el mismo original, enviado a personas sin relación alguna con el mundo editorial, puede carecer por completo de cualidades víricas".

Hacia el fin de la carta de Walton, el texto se sale con total desenvoltura de la cuartilla y me grita directamente, en beneficio de sí misma: "Finalmente, yo (este texto) estaría encantado de ser incluido, en todo o en parte, en su próximo comentario sobre autoalusión. Teniendo esto presente, permítame presentar por anticipado mis excusas por infectarle"

Mientras Walton mencionaba a Dawkins en su carta, Going parece no tener noticia alguna de éste, lo que hace su carta aún más notable, dado su notable parentesco con las ideas de Dawkins. Going sugiere que, para empezar, nos fijemos en la Frase *A*: "Tiene usted la obligación de convencer a otros de que esta frase es verdadera". Como él mismo dice: "Si fuera usted tan bobo como para creerse la frase, intentaría usted convencer a sus amigos de que *A* es verdadera. Si ellos fueran igual de bobos, también se esforzarían en convencer a sus amigos, y así progresivamente hasta que toda mente humana contuviera en sí una copia de *A*. Por tanto, *A* es una frase autorreplicante. De forma más concreta, es equivalente a un virus en el plano intelectual. Si la Frase *A* llegara a introducirse en un cerebro tomaría control de la maquinaria mental y se valdría de ella para producir cientos de copias de sí misma en otras tantas mentes.

"Lo malo de la Frase *A* es que, como salta a la vista, es absurda; resulta imposible que nadie se la crea. Fijémonos, sin embargo, en el siguiente:

Sistema *S*:
Comienzo:
*S*1: Bla.
*S*2: Bla bla.
*S*3: Bla bla bla.
: :
: :
: :
*S*99: Bla bla bla bla. bla bla...
*S*100: Tiene usted la obligación de convencer a otros de que el Sistema *S* es verdadero.
Fin.

"Aquí *S*1 hasta *S*99 denotan enunciados que, tomados conjuntamente, constituyen un sistema de creencias de cierta coherencia. Si el Sistema *S* tomado en su conjunto resultase convincente, tal sistema sería autorreproductivo. El Sistema *S* resultaría especialmente convincente si en lugar de ser *S*100 explícitamente enunciado se dedujera como consecuencia lógica de las otras ideas del sistema."

Nos referiremos al enunciado *S*100 de Going llamándolo "gancho" o "anzuelo" del Sistema *S*, pues con auxilio de este gancho espera el Sistema *S* elevarse a una potencia de más alto nivel. Observemos que, por sí solo, un gancho que dijera simplemente "tiene usted el deber de creerme" no sería entidad vírica viable; para poder "volar" necesita arrastrar consigo elementos extra, lo mismo que una cometa necesita de una cola que la estabilice. La fuerza ascensional pura pronto se descontrola y autodestruye; por el contrario, la fuerza ascensional controlada puede elevarse a sí misma y a su controlador. Análogamente, *S*100 juntamente con el todo formado por *S*1 – *S*99 son simbiontes: sus papeles son complementarios, de mutuo sostén a fin de lograr la supervivencia del meme que conjuntamente constituyen. Going procede ahora a desarrollar un poco más el tema:

"¿Existen sistemas de ideas reales que se comporten como el Sistema *S*? Yo conozco por lo menos dos. Fijémonos en el siguiente:

Sistema *X*
Comienzo:
*X*1: Quien no creyere en el Sistema *X* se abrasará en el infierno.
*X*2: Tiene usted el deber de salvar a los demás del sufrimiento eterno.
Fin.

"Si creyéramos en el Sistema *X* intentaríamos salvar a otros del infierno, convenciéndolos de que el Sistema *X* es verdadero. Por tanto, el Sistema *X* lleva implícito un 'gancho', consecuencia de sus dos enunciados explícitos: el Sistema *X* es un sistema autorreproductivo de ideas. No es preciso ser impío para sugerir que este mecanismo ha podido tener algún papel –por pequeño que sea– en la difusión del Cristianismo.

"Observemos que el Sistema *X* todavía no es creíble. Hacen falta no poca suerte y mucha habilidad para producir un sistema de ideas que merezca crédito. Tenemos una forma más siniestra de autorreplicación en la Frase *B*: 'La burguesía es la opresora del proletariado'. Si creyéramos verdadera la Frase *B* querríamos liberar al proletariado de la opresión burguesa. Pronto descubriríamos que carecemos de fuerzas suficientes para tal empresa. Nos haría falta la ayuda de miles de personas animadas de la misma convicción. El primer paso para conseguir su ayuda forzosamente tendría que consistir en convencerlos de que *B* es verdadera. Por consiguiente, de la Frase *B* sobresale un gancho, y la Frase *B* es, así pues, un sistema de ideas autorreplicante.

"El enunciado *B* es tan sólo un caso particular de esta otra proposición general, Frase *V*: "El *malvado* está *ha-*

ciendo daño a la *víctima*". En ella, la palabra *malvado* debe ser reemplazada por el nombre de algún grupo real (capitalistas, comunistas, imperialistas, judíos, masones, aristócratas, hombres, extranjeros, etc...). *Víctima* ha de ser sustituida por la víctima correspondiente y *hacer daño*, por la acción adecuada al caso. El resultado será un sistema autorreplicante de ideas, por razones idénticas a las explicadas para *B*. Observemos que cada una de las sustituciones propuestas da lugar a un sistema de ideas históricamente atestiguado. Tanto así que cuesta pensar que haya alguna forma de extremismo político no reductible a *V*, y por tanto, al anzuelo cebado en *S*100. Duda uno en explicar acontecimientos históricos reales mediante mecanismos tan ridículos. Empero..."

Going conduce sus ideas hasta la divertida conclusión siguiente: "Imaginemos que al objeto de parodiar mis tesis sea propuesto el Enunciado *E*: 'Las ideas autorreproductivas están conspirando para esclavizar nuestras mentes'. Este enunciado 'paranoide' es palmariamente una idea de tipo *V*. Por consiguiente, la tesis parece estar describiéndose a sí misma. Más todavía, si aceptamos *E* tendremos que decir que esta idea de tipo *V* implica la necesidad de desconfiar de todas las ideas de tipo *V*. He aquí la paradoja de Epiménides."

Es interesante observar que todas estas personas, que han estado explorando este tipo de ideas, hayan dado ejemplos que van desde la muy pequeña escala de las tonadas pegadizas (Dawkins menciona el tema inicial de la Quinta Sinfonía de Beethoven) y los aforismos y refranes (entre ellos, la propia palabra "meme") hasta la muy grande de ideologías y religiones. Dawkins utiliza la expresión "complejo memético" para referirse a estos grandes aglomerados de memes. Yo prefiero usar una sola palabra: "esquema".

Una de las razones es que "esquema" se adapta muy bien al sentido propuesto por el psiquiatra y escritor Allen Wheelis en su novela *The Scheme of Things*. En ella, el personaje central es un psiquiatra y escritor llamado Oliver Thompson, cuyos lúgubres ensayos se encuentran dispersos por todo el libro, entretejidos con episodios evocadores, de brillante colorido. Thompson está obsesionado por las diferencias entre, por una parte, "la ruda naturaleza de la existencia, sin ornamento ni mediación", a la que se refiere repetidamente con la frase "la forma de ser las cosas", y por otra, "los esquemas de cosas", inventados por seres humanos –procedimientos para encontrar orden y significado a partir de la forma en que las cosas son. He aquí algunas reflexiones de Thompson acerca de tal tema:

"Quiero escribir un libro... la historia de un hombre cuya vida llegue a servir de metáfora para la experiencia toda del hombre sobre la Tierra. Expondrá su búsqueda a través de una sucesión de esquemas de cosas, mostrará el derrumbamiento, vez tras vez, de cada una de las pautas que descubre, expondrá su constante ida en busca de otra, siempre con la esperanza de que el esquema de cosas que descubre y que por el momento es válido *no* sea de ninguna manera un esquema de cosas, sino realidad, forma de ser las cosas y, por consiguiente, un absoluto que resista eternamente, dentro del cual pueda él servir, al cual pueda contribuir y a través del cual dé sentido a su vida mortal y alcance así la vida eterna...

"El esquema de cosas es un sistema de orden. Comienza por ser nuestra visión del mundo, para terminar finalmente *convirtiéndose* en nuestro mundo. Vivimos en el espacio definido por sus coordenadas. Es verdadero por ser evidente por sí mismo; es aceptado de forma tan natural y automática que no se tiene conciencia de haber efectuado el acto de aceptación. Lo recibimos con la leche de la propia madre, es coreado en la escuela, proclamado desde la Casa Blanca, insinuado por la televisión, convalidado por Harvard. Lo mismo que el aire que respiramos, el esquema de las cosas desaparece, pasando simplemente de ser realidad, convirtiéndose en la forma de ser las cosas. Es la mentira necesaria para la vida. El mundo, tal como existe más allá de tal esquema, se convierte en algo difuso, irrelevante, y en gran medida imperceptible, acabando por no existir tan siquiera...

"Ningún esquema de cosas ha sido jamás coextensivo con la forma de ser las cosas y al mismo tiempo veraz con respecto a la forma de ser las cosas. Todos los esquemas de cosas conllevan limitación y rechazo...

"Un esquema de cosas es un plan de salvación. Lo bien que funcione dependerá de su alcance y de su autoridad. Si es pequeño, ni siquiera grandes logros en su servicio conseguirán ahuyentar el pavor de la muerte. Un esquema de cosas puede ser tan amplio como el Cristianismo, o tan minúsculo como la liga de fútbol escolar de Villachica. Buscamos el esquema de cosas mayor posible no porque ansiemos hallar la verdad, sino porque cuanto más comprehensivo sea tanto mayor será su promesa de lograr desterrar la angustia. Si logramos hacer que nuestras vidas signifiquen algo en el seno de un esquema cósmico viviremos en la certidumbre de inmortalidad. Los atributos que determinan el éxito y la pervivencia de un esquema de cosas son su esfera de acción, las oportunidades de participación que ofrezca y la convicción con la que sea respaldado como verdadero por sí mismo. El enorme éxito que tuvo el Cristianismo durante mil años fue consecuencia de haber tenido alcance universal, de contener en sí a todo y en sí dar cuenta de todo, asignando a cada cosa un lugar idóneo; ofreciendo a todo hombre, príncipe o mendigo, sabio o necio, el privilegio de trabajar en la viña del Señor; y de haber sido aceptado en todo el mundo occidental.

"Conforme un esquema de cosas se va modificando por incursiones de lo existente extramuros va perdiendo autoridad, es menos capaz de ahuyentar el temor; sus fieles comienzan a abandonarlo. Al cabo termina convirtiéndose en algo raro y exótico, existiendo solamente como historia y transformándose finalmente en mito. Lo que hoy conocemos como leyendas fueron en tiempos detalladas descripciones de la realidad. La Iglesia tenía razón al parar los pies a Galileo: actividades como la suya introducen en el seno del esquema de cosas imperante un nuevo ser que acabará por destruir el esquema."

Tomado al modo de Wheelis, "esquema" parece ser sustituto idóneo para el "complejo memético" de Dawkins. Un esquema impone una especie de ordenación perceptual, de arriba abajo, en el mundo; una ordenación que se propaga implacablemente, lo mismo que el Sistema *S* de Going, gracias a su "anzuelo". La descripción que Wheelis da de la inadecuación de todos los "esquemas de cosas" para capturar con precisión y plenitud la "forma de ser las cosas" es fuertemente reminiscente de la vulnerabilidad de todos los sistemas formales suficientemente potentes, que son, o bien incoherentes, o bien incompletos –vulnerabilidad que emana de otro tipo de "gancho": el famoso "gancho" gödeliano, que nace de la capacidad de tales sistemas para autoaludirse. Ni Wheelis ni Thompson mencionan para nada esta analogía. Volveremos a Gödel dentro de poco.

Al lector de *The Scheme of Things* le llamará la atención la semejanza de profesiones de Wheelis y de su protagonista. Es imposible leer el libro sin ba-

rruntar que las opiniones de Thompson han de ser reflejo de las de Wheelis; empero, ¿quién podría asegurarlo? Es un acertijo. Todavía más incitante es el título del libro escrito por Thompson, que Wheelis menciona como por casualidad hacia el final de su novela: es *The Way Things Are* (La forma de ser las cosas) –llamativo contraste con el título del libro que lo contiene. Nos preguntamos cuál será el significado de este elegante fruncido literario, donde un nivel se repliega sobre otro. ¿Qué símbolo encarna Wheelis en el seno de Wheelis?

Los giros de este tipo, mediante los cuales una cosa (una frase, un libro, un sistema, una persona) parece aludir a sí misma, pero lo hace sólo por alusión a algo que *se le parece*, se llaman "autoalusión indirecta". Así hacemos, por ejemplo, cuando al mirarnos al espejo decimos "He aquí un tipo bien parecido". Ejemplo éste muy sencillo, porque la relación entre algo y la imagen que del algo nos devuelve el espejo nos es tan familiar y evidente que no parece existir distancia alguna entre los referentes directo e indirecto: los igualamos por completo. No parece, por tanto, que la alusión tenga nada de indirecta.

Por otra parte, todo depende de la facilidad con que nuestros sistemas perceptuales alcancen a convertir las imágenes del espejo en sus originales, así como de otras cualidades de nuestro sistema cognitivo, que nos capacitan para ver a través de varios estadios de traducción sin tener que prestar atención a cada uno de los niveles, como sucede cuando miramos a través de varios metros de agua clara y vemos, no el agua, sino únicamente los objetos yacentes en el fondo.

Como es obvio, algunas autoalusiones indirectas son más sutiles que otras. Fijémonos en el caso de Santi y Susi, una pareja que, ostensiblemente, está hablando de sus amigos Tina y Toni. Sucede que las relaciones entre Susi y Santi atraviesan por ciertas dificultades, y que tales dificultades son sumamente análogas a las que están pasando Tina y Toni, si bien en cada pareja los papeles que dentro del problema desempeñan hombre y mujer son uno reverso del otro: dentro de sus respectivas relaciones, Santi es a Susi lo que Tina es a Toni. Por consiguiente, conforme se va desarrollando la conversación entre Susi y Santi vemos que, aunque superficialmente, ésta concierne a sus amigos, en otro nivel, están *en realidad* hablando de sí mismos, en la medida en que se ven reflejados en otras personas. Es casi como si al hablar de Toni y Tina, Santi y Susi estuvieran analizando una fábula de Esopo que aludiera a su propia situación. Tenemos una situación que se desarrolla simultáneamente a dos niveles, y cuesta trabajo decir hasta qué punto es cada uno de los interlocutores consciente del intercambio de mensajes de doble sentido, uno referente a sus amigos, otro de preocupación por sí mismos.

Puede sacarse partido a la autoalusión indirecta en las formas más inesperadas y en circunstancias de la máxima seriedad. Tomemos el caso del presidente Reagan, quien recientemente, con ocasión de la fuerte tirantez en las relaciones ruso-norteamericanas a causa de Irán, hizo el esfuerzo extraordinario de recordar el proceder del presidente Truman en 1945, cuando éste lanzó contra los rusos amenazas muy directas acerca de la posibilidad de que los Estados Unidos llegasen a emplear bombas atómicas, de ser ello necesario para contrarrestar una posible intervención rusa en Irán. Sin más que traer a colación el recuerdo del incidente, Reagan estaba invitando a que se estableciera un paralelismo entre Truman y él, revelando de esta forma una amenaza nada velada, pero en la que nadie podía señalar explícitamente nada. Sencillamente, era imposible que ningún ser suficientemente consciente dejase de establecer el paralelismo; la conexión entre ambas situaciones saltaba demasiado a la vista.

Así pues, ¿se presenta realmente la autoalusión en sólo dos variedades –la directa y la indirecta– o son acaso estos dos tipos apenas dos puntos distantes pertenecientes a un continuo? Sin dudar, yo diría que lo último. Podemos además suprimir el prefijo "auto", convirtiendo así el problema en el más general de la alusión o la referencia. En sustancia, una cosa alude, o se refiere, a otra siempre que un ser consciente encuentra un paralelismo suficientemente sugestivo entre los papeles que ambas desempeñan en el seno de estructuras o sistemas más amplios. Hay que andar con cautela en este punto. Al decir "consciente" quiero decir una máquina capaz de –y ansiosa por– detectar analogías, máquina que ha de ser capaz de desenvolverse con éxito en el mundo gracias a sus percepciones; no es preciso en cambio que sea humana ni orgánica. En realidad, yo llevaría más lejos aún la abstracción del término "referencia", así: No es preciso que la correspondencia de sistemas y papeles encargada de establecer la referencia sea realmente percibida por semejante ser; bastaría con que la correspondencia existiera y fuese *perceptible* por él.

La película *La mujer del teniente francés* (basada en una novela de John Fowles con igual título) nos proporciona un elegante ejemplo de ambigüedades en los grados de referencia. Consiste en dos viñetas entretejidas tomadas de dos historias de desarrollo concurrente, que contienen ambas complejas aventuras románticas. Una se desarrolla en la Inglaterra victoriana; la otra, en el presente. El hecho de que haya dos historias galantes ya sugiere, aunque levemente, que debe existir entre ellas alguna correspondencia. En realidad se sugiere mucho más que eso. Hay entre ambos episodios semejanzas estructurales: ambos presentan cualidades triangulares, y cada uno se centra en un solo de los lados del triángulo. En ambas historias, los papeles de amantes masculinos están encomendados a los mismos dos actores, viéndoles nosotros en contextos alternativos y con rasgos de personalidad alternantes. La razón de estas "coincidencias" es que la historia contemporánea se refiere al rodaje de una película basada en la historia victoriana.

Conforme ambas historias van paralelamente desplegándose van presentándose cierto número de coincidencias que sugieren con más fuerza todavía que es preciso establecer una correspondencia entre ambas. Queda sin embargo a cargo del espectador la tarea de efectuarla; nunca le es explícitamente solicitada. Empero, al cabo de cierto tiempo resulta inevitable. Lo más grato de este juego es la libertad que se le deja al espectador: hay amplio campo para la licencia artística al buscar y ver conexiones, para sospecharlas, e incluso, inventarlas.

La referencia indirecta de carácter artístico es mucho menos precisa que la referencia indirecta de tipo formal. Nos encontramos esta última cuando dos sistemas formales son isomórficos, es decir, cuando tienen estructuras internas estrictamente análogas, de forma que exista una correspondencia biunívoca entre los papeles de una y otra, rigurosamente establecida. En tales casos, la existencia de referencia genuina nos resulta tan clara como en el caso de quien habla de su imagen en el espejo: la tomamos como autoalusión inmediata y pura, sin detectar siquiera su carácter indirecto, las etapas de traducción salvadas por el isomorfismo. Tanto así que la conexión puede incluso parecer demasiado directa para ser tildada de "alusión", pasando a ser considerada como mera identidad.

Esta inmediatez perceptual es la razón de que un famoso enunciado de la lógica matemática, el enunciado de Gödel, *G*, sea llamado "auto-alusivo". Todo el mundo acepta la idea de que *G* habla acerca de un número *g*; el delicado paso gödeliano consiste en percartarse de que el número *g* tiene en el sistema de los números naturales un rol estrictamente análogo al que desempeña el *enunciado G* en el sistema axiomático donde está enunciado. Esta referencia oblicua, afín a la de Wheelis en su libro, que *G* hace a sí mismo por intermedio de su "imagen" *g* suele aceptarse como genuina autoalusión. (Adviértase que todavía se tiene una correspondencia adicional: *G* desempeña el papel de Wheelis, y su número gödeliano, *g*, el de Thompson, *alter ego* de Wheelis.)

Las dos correspondencias abstractas que establecen el carácter autoalusivo de *G*, haciéndolo así parece indirecto, pueden replegarse y fundirse en sólo una, en conformidad con un aforismo que pudiéramos enunciar así: "Si *A* alude a *B*, y *B* es justamente como *C*, entonces *A* alude a *C*". Podemos hacer, por ejemplo, que *A* y *C* sean Wheelis, y denotar por *B* a Thompson. De esta forma, la autoalusión de Wheelis se convierte en "teorema". Como es obvio, tal teorema no ha sido rigurosamente "demostrado", pues para tragar nuestro aforismo hay que echarle uno o dos granos de sal. Ser "justamente como" alguna otra cosa es cuestión discutible en grado sumo.

En contextos formalizados, donde "ser justamente como" viene a ser sinónimo de "desempeñar papel isomórfico al de", nuestro aforismo puede tener significado estricto, y puede por tanto servir para justificar más rigurosamente un teorema. En particular, si *A* y *C* se toman iguales a *G*, y a *B* se le asigna el valor *g*, nuestro aforismo rezará: "Si *G* alude a *g*, y *g* tiene papel isomorfo al de *G*, entonces *G* alude a *G*". Puesto que las premisas son verdaderas, también lo será la conclusión. De acuerdo con este esquema de cosas *G* es, pues, una frase genuinamente autoalusiva y no algún tipo de ilusión lógica, tan engañosa como un grabado de Escher.

```
                              *
                            Write
                       down ten ‘a’s,
                  eight ‘c’s, ten ‘d’s,
           fifty-two ‘e’s, thirty-eight ‘f’s,
       sixteen ‘g’s, thirty ‘h’s, forty-eight ‘i’s,
  six ‘l’s, four ‘m’s, thirty-two ‘n’s, forty-four ‘o’s,
  four ‘p’s, four ‘q’s, forty-two ‘r’s, eighty-four ‘s’s,
seventy-six ‘t’s, twenty-eight ‘u’s, four ‘v’s, four ‘W’s,
 eighteen ‘w’s, fourteen ‘x’s, thirty-two ‘y’s, four ‘:’s,
       four ‘*’s, twenty-six ‘-’s, fifty-eight ‘,’s,
             sixty ‘‘’s and sixty ‘’’s, in a
                    palindromic sequence
                        whose second
                          half runs
                            thus:
                            :suht
                          snur flah
                        dnoces esohw
                    ecneuqes cimordnilap
             a ni ,s’’‘ ytxis dna s’‘‘ ytxis
       ,s’,‘ thgie-ytfif ,s’-‘ xis-ytnewt ,s’*‘ ruof
 ,s’:‘ ruof ,s’y‘ owt-ytriht ,s’x‘ neetruof ,s’w‘ neethgie
,s’W‘ ruof ,s’v‘ ruof ,s’u‘ thgie-ytnewt ,s’t‘ xis-ytneves
  ,s’s‘ ruof-ythgie ,s’r‘ owt-ytrof ,s’q‘ ruof ,s’p‘ ruof
  ,s’o‘ ruof-ytrof ,s’n‘ owt-ytriht ,s’m‘ ruof ,s’l‘ xis
       ,s’i‘ thgie-ytrof ,s’h‘ ytriht ,s’g‘ neetxis
           ,s’f‘ thgie-ytriht ,s’e‘ owt-ytfif
                  ,s’d‘ net ,s’c‘ thgie
                       ,s’a‘ net nwod
                            etirW
                              *
```

Frase autodocumentada de Lee Sallows

La autoalusión indirecta sugiere la idea de autorreplicación indirecta, en la cual una entidad vírica, en lugar de producir una copia exacta de sí misma, engendra otra entidad que desempeña el papel correspondiente a ella, pero en algún otro sistema, por ejemplo, en una traducción al castellano, o por ejemplo también, generando una cadena de signos formada por todos los números de serie de sus piezas componentes juntamente con una colección de sobres pre-dirigidos, que contengan cada uno un cheque a favor de la fábrica que produce el correspondiente componente, más una lista de instrucciones que explique lo que debe hacerse con todas las piezas sueltas cuando éstas se reciban a vuelta de correo.

Tal vez este ejemplo les suene familiar a los lectores. Se trata de una alusión directa al Gran Trofeo Von Neumann, convocado en esta misma sección el mes de marzo de hace un año, consistente en crear una frase autodocumentada, autodescriptiva, cuyos únicos elementos entrecomillados –es decir, citados, no mencionados– sean letras o palabras; nunca frases completas. Conforme he ido recibiendo soluciones aspirantes al premio he descubierto que muchos lectores no llegaron a comprender lo que se pedía. El concurso nació como resultado de una objeción acerca de la excesiva complejidad de la "semilla" (la sección citada entre comillas) de la versión de la paradoja de Epiménides propuesta por W. V. Quine:

"produce falsedad al agregarla tras su referencia" produce falsedad al agregarla tras su referencia.

Para mejor apreciar lo objetable de ella, imaginemos que se desee disponer de un robot explorador del espacio y capaz de construir copias de sí mismo a partir de materias primas que encuentre en su periplo. Una manera que podría ocurrírsenos sería hacer un robot simétrico, como un ser humano. Se podría imaginar también que el robot fuese capaz de sacar una copia especular de cualquier estructura con que tropiece. Programemos el robot para que escudriñe constantemente el mundo, lo mismo que el halcón en busca de presa. La imagen buscada es, en el caso del robot, la de un objeto idéntico a su propia mitad izquierda. No se exige que el robot tenga *conciencia* de que su objeti-

vo es idéntico a su mitad izquierda; su búsqueda proseguiría alegremente en pos de lo que sólo parece ser una estructura muy compleja y arbitraria. Al fin, cuando tras haber estado revisando y oteando el universo durante 17 gúgolplex de años (un gúgol es 10^{100}; un gúgolplex es un gúgol elevado a un gúgol) el robot acaba tropezándose con una tal estructura, el autómata activa su dispositivo de fabricación de copias, capaz de reproducir la imagen especular de una estructura, y crea una mitad derecha. El último paso consiste en ensamblar ambas mitades. ¡Zas! Queda lista una copia de sí mismo. Es tan fácil como comerse un pastel –siempre, claro, que estemos dispuestos a esperar 17 gúgolplex de años, minuto más, minuto menos.

El aspecto arbitrario y peculiar de la frase de Quine es que su semilla es la mitad de compleja (lo que es decir casi igual de compleja) que la propia frase. Volviendo a nuestra parábola del robot, lo que idealmente nos gustaría de un robot autorreplicante sería la capacidad para construirse a sí mismo literalmente a partir del terreno que pisa: por ejemplo, siendo capaz de beneficiar mineral de hierro, fundirlo, moldearlo, fabricar tornillos y tuercas, laminarlo, etcétera, y ser finalmente capaz de ensamblar el despiece en subunidades cada vez mayores, hasta procrear una copia suya a partir de materias genuinamente primas. Tal era el espíritu del Concurso Von Neumann: lo que yo solicitaba era un equivalente lingüístico del "robot autorreplicante de segunda especie".

Concretamente, esto significa dar una frase autodocumentada o autoconstructiva que construye sus dos mitades –su semilla, o sea, la parte entrecomillada, y su regla de construcción, no entrecomillada– partiendo de materiales lingüísticos en bruto, es decir, letras o palabras. El error cometido por muchos lectores fue presentar como semilla una larga secuencia de palabras (o letras) citadas individualmente en un orden específico, sacando después partido de esa ordenación en la regla de formación. Para eso podían igualmente haber citado una larga cadena ordenada de caracteres, como hizo Quine. Por el contrario, la idea de mi concurso era que toda la estructura del objeto construido tendría que provenir exclusivamente de algún principio enunciado en la regla de construcción, y no a partir de la estructura interna de la semilla.

Exactamente igual que será muy improbable que un robot autorreproductivo encuentre ya ordenados y listos para montaje todos sus componentes al llegar a un lugar cualquiera, y tendrá por tanto que depender de su "cerebro" o su programa para reconocer las materias primas en cada lugar u ocasión en que se encuentre, a fin de apropiarse de ellas e ir ensamblando una copia de sí mismo, la frase deseada debe tratar las "piezas" contenidas en la semilla con independencia del orden en que éstas sean nombradas y, no obstante, ha de ser capaz de construirse a sí misma en el orden apropiado a partir de ellas. No hay por eso inconveniente en entrecomillar la semilla completa con un solo par de comillas, en lugar de ir acotando palabra por palabra. Lo esencial es que no se saque partido del orden en que sean presentadas las palabras (y mejor todavía, las letras) que componen la semilla.

La semilla de una solución ideal sería un largo inventario de componentes, análogo a la lista de ingredientes de una receta de cocina; tal vez una lista de 50 "*e*", después 46 "*t*", y así sucesivamente. Está claro que esas letras no podrán permanecer en ese orden; constituyen sencillamente las primeras materias con las que ha de ser construida la nueva frase. Nadie ha enviado todavía soluciones a nivel tan primordial. Unas cuantas personas, sin embargo, han remitido soluciones adecuadas, ya que no maravillosamente elegantes, con semillas a nivel de palabra. La primera de las soluciones correctas que recibí me fue enviada por Frank Palmer, de Chicago, quien consiguientemente recibe como trofeo el primer "Johnnie", que es un billete de un dólar autorreplicante que se otorga al Gran Vencedor del concurso. Lástima que este billete consuma totalmente el cuerpo de su poseedor en su extravagante proceso de autorreproducción; por ello, lo más prudente será dejarlo encerrado a buen recaudo para protegerse de su voraz apetito.

Palmer representó varias versiones. En ellas, para distinguir la semilla de la regla de construcción mayúsculas y minúsculas. He aquí una de sus soluciones (ligeramente modificada por razones de traducción):

al alfabetizarla, anótese con cursivas esta expresión AL LA CON EYE POR ESTA TEXTO VERSAL ANOTESE CURSIVA PALABRA EXPRESION PERMUTESE FINALMENTE, PALINDROMICA ALFABETIZARLA, *finalmente, la palabra palindrómica permútese por texto versal.*

Estudiemos cuidadosamente, paso por paso, su funcionamiento. Hemos de tener bien presente que las instrucciones a seguir están escritas en cursivas minúsculas, mientras que las palabras en mayúsculas versales no deben ser leídas como instrucciones. Ni tampoco deberán ser consideradas instrucciones las palabras en minúscula con las que pronto estaremos trabajando, y que son a modo de cuerpo inerte y anestesiado de un paciente que está siendo intervenido quirúrgicamente, y a quien, después de la operación, despertaremos y reanimaremos. En marcha, pues. Hemos de poner la semilla en orden alfabético, y, al tiempo de hacerlo, ir anotándola con letra cursiva. Consideraremos que las comas forman parte de la palabra que las precede. Para mayor claridad, haremos primero la alfabetización y luego la conversión en cursivas:

AL ALFABETIZARLA, ANOTESE CON CURSIVAS ESTA EXPRESION EYE FINALMENTE, LA PALABRA PALINDROMICA PERMUTESE POR TEXTO VERSAL

Ahora la anotamos con minúsculas cursivas. Obtendremos así el texto "anestesiado" al que antes aludí:

al alfabetizarla, anótese con cursivas esta expresión eye finalmente, la palabra palindrómica permútese por texto versal

Perfectamente. La instrucción final nos ordena localizar la palabra palindrómica (eso es fácil: la única palabra capicúa de todo el texto es *eye*) y sustituirla por el texto en versales (esto es, una copia del texto semilla original). Al hacerlo se obtiene:

al alfabetizarla, anótese con cursivas esta expresión AL LA CON EYE POR ESTA TEXTO VERSAL. ANOTESE CURSIVA PALABRA EXPRESION PERMUTESE FINALMENTE, PALINDROMICA ALFABETIZARLA, *finalmente, la palabra palindrómica permútese por texto versal.*

¡Y ésta es copia exacta de la frase inicial! Ahora podemos reanimarla de su anestesia, y dejarla que se reproduzca a su vez.

El paso crítico, qué duda cabe, es la alfabetización, pues ella convierte la semilla arbitrariamente ordenada en una frase con sentido, a base tan sólo de sacar partido de un presunto conocimiento del abecedario, y de una mane-

ra enteramente mecánica. Mas, ¿por qué no? Es perfectamente razonable suponer un conocimiento tipográfico superficial de letras y palabras, pues tal conocimiento maneja el material impreso a nivel de materia prima, de forma estrictamente sintáctica, sin prestar atención a los significados que contenga. Exactamente de igual forma manejan los enzimas a los ADN y ARN, en el seno de la célula viva, troceándolos y ensamblándolos de forma estrictamente química, sin considerar los "significados" que lleven en sí. Lo mismo que valencias y afinidades químicas son "datos" al estudiar el comportamiento de las moléculas celulares, también los hechos tipográficos y alfabéticos son "datos" en el Concurso Von Neumann.

En la solución de Palmer la semilla está a su vez ordenada de acuerdo con las longitudes de sus palabras, pero ello es completamente irrelevante. Cualquier otra presentación, aunque fuese aleatoria, hubiera servido, y éste es el punto crucial que muchos lectores no percibieron.

Otra solución bastante elegante fue enviada por Martin Weichert, de Münich. Es como sigue:

Copie entrecomillada, lexicográficamente ordenada "Copie ordenada entrecomillada lexicográficamente"

Funciona según el mismo principio de la frase de Palmer, y sigue exhibiendo una semilla cuya estructura interna carece de importancia para la autorreplicación. Weichert envió también una solución palindrómica en esperanto, en la cual tiene papel fundamental la flexibilidad de posición de las palabras en el seno de la frase, propia de ese idioma. Michael Borowitz y Bob Stein, de Durham, enviaron asimismo soluciones parecidas a la de Palmer.

Finalmente, el ganador de la medalla de oro de las frases autodocumentadas del año pasado, Lee Sallows, quedó un tanto picado al sugerir yo que no había prestado suficiente atención a la diferencia entre uso y mención. Al parecer, tal observación mía le indujo a construir otra frase autodocumentada aún más compleja, que podemos ver a la izquierda. Aunque no es una frase autorreproductiva –pues no enuncia explícitamente su propia regla de construcción– sí es otra de las maravillosas gemas de Sallows. Dejaré por ello sin empañar el oro de su medalla. (Y espero satisfacer así a los puristas que me escribieron recordándome que el oro no se empaña.)

Taller y laboratorio

Experimentos ingeniosos y sencillos para explicar tres conceptos de física superior

Jearl Walker

Más de uno pensará que las pruebas experimentales relativas a conceptos de la física superior se hallan fuera del alcance del aficionado medio. Sin embargo, Richard E. Crandall, del Reed College, acaba de idear tres experimentos que demuestran lo contrario. El primero aborda el corrimiento Doppler de la luz, y nos lo patentiza acústicamente. Con el segundo determina la constante de Planck, importantísimo personaje de la mecánica cuántica. Por fin, con el tercero, mide la constante de la gravitación universal, que representa un papel del mismo peso en la teoría de la gravitación de Newton. En todos ellos, Crandall se las ha arreglado para reducir a un mínimo las dificultades.

Las figuras de interferencia luminosa son el pan nuestro de cada día en las aulas de física y perfectamente conocidas por la inmensa mayoría de aficionados. Se observan por visión directa o por barrido con un detector de luz. Bien, pues Crandall, ayudado por su alumno Edward H. Wishnow, ha ideado un ingenioso procedimiento para oírlas. ¿Cómo?

Comienza por enviar una haz proveniente de un láser de helio-neón de dos miliwatt hacia un portaobjetos de microscopio. Parte del haz se refleja en éste e ilumina un fototransistor (Motorola MRD3052 NPN, u otro equivalente), el cual hace de detector de luz; el resto atraviesa el portaobjetos y se refleja en un espejo (u otra cosa reluciente) instalado en el cono de un pequeño altavoz. Luego, parte de la luz reflejada en el espejo interfiere con la luz procedente directamente del portaobjetos.

La polarización del transistor (para un nivel cero arbitrario) se consigue con una fuente de 15 volt en serie con una resistencia de 30.000 ohm. Cuando el transistor se ilumina con la luz procedente del portaobjetos, genera una tensión eléctrica que es detectada por un amplificador estéreo corriente. Esa señal amplificada se lleva a un segundo altavoz que la convierte en audible. El otro canal de salida del amplificador está conectado al altavoz que refleja parte del haz láser.

Al mover el espejo, varía la señal del transistor y también la emisión acústica del altavoz productor de sonido. Las propias perturbaciones del aire de la habitación son capaces de producir variaciones perceptibles del sonido. Por ello, para controlar mejor las variaciones, se alimenta el segundo canal de entrada del amplificador con una señal senoidal. Esta se envía al altavoz reflector, obligándolo a oscilar estacionariamente. Así, la emisión acústica de la instalación varía de una manera continua.

La interferencia de la luz en el transistor admite dos tipos de explicaciones. Según una de ellas, el factor crítico es la diferencia entre la distancia que recorre la luz tras reflejarse en el portaobjetos y la que recorre tras reflejarse en el espejo. Las ondas luminosas, cuando brotan del láser, están todas aproximadamente en fase. Algunas se reflejan en el portaobjetos y viajan hacia el transistor; las demás recorren un trayecto distinto para llegar al espejo y al transistor.

La diferencia entre los caminos recorridos por uno y otro conjunto de ondas determina la interferencia en el transistor. Si los trayectos son tales que ambos conjuntos de ondas llegan en fase, la interferencia será constructiva: el transistor se ilumina fuertemente y transmite una señal intensa al amplificador. Si los caminos recorridos son tales que las ondas llegan en oposición de fase, la interferencia será destructiva: el transistor no se ilumina y envía una señal más débil al amplificador.

Supongamos que las primeras ondas luminosas lleguen en fase. Supongamos asimismo que el láser se aleje del espejo una distancia igual a un cuarto de la longitud de onda de la luz que emite. Entonces, la luz reflejada en el altavoz tendrá que recorrer una distancia adicional igual a una semilongitud de onda. (O sea, deberá viajar un cuarto de longitud de onda más para llegar al altavoz; a la vuelta, lo mismo para llegar al transistor.) Esta distancia adicional hará que las ondas alcancen el transistor en oposición de fase. Así, el cono del altavoz reflector, a la vez que se mueve paralelamente al haz luminoso, determina que varíe la intensidad de la señal del transistor.

Se puede oír el movimiento desorganizado del espejo a medida que lo van perturbando los leves movimientos del aire que hay en la habitación. Pero si una señal senoidal lo excita de modo que oscile de manera más regular, las variaciones de la interferencia en el transistor generarán una señal repetitiva. El espejo se desplaza mucho más que un cuarto de longitud de onda, por lo que, durante cada oscilación, la interferencia en el transistor producirá numerosos máximos y mínimos.

Vayamos con la segunda versión. Aunque distinta, es una explicación afín hasta la ahora descrita. Se basa en el efecto Doppler de la luz. La longitud de onda es función de la frecuencia, que se define como el número de ondas que pasan por segundo por un punto dado. La frecuencia de la luz percibida por un observador depende, en parte, de su movimiento con relación a la fuente luminosa. Supongamos que el observador se halle en reposo respecto a la fuente; así percibirá una luz de una frecuencia determinada. Si la fuente avanza hacia él, la frecuencia que perciba será mayor. Este desplazamiento de la frecuencia se llama a veces corrimiento hacia el azul, porque lo es hacia una frecuencia más alta y, por ello, hacia el extremo azul del espectro visible. Si la fuente se aleja del experimentador, la frecuencia de la luz que perciba será menor. A este deplazamiento de la frecuencia se alude cuando se habla de corrimiento hacia el rojo. Ambos desplazamientos, hacia el azul y hacia el rojo, son efectos Doppler.

También se produce el fenómeno, claro está, cuando el observador se acerca o se distancia de la fuente. La cuantía del corrimiento depende de las velocidades relativas del observador y de la fuente. Cuanto más se aproxima la velocidad a la de la luz, tanto mayor será el efecto Doppler, hecho que resulta crucial para deducir el movimiento de los cuerpos celestes; midiendo el corrimiento de la luz emitida por éstos se calcula con qué velocidad se están acercando o alejando de la Tierra.

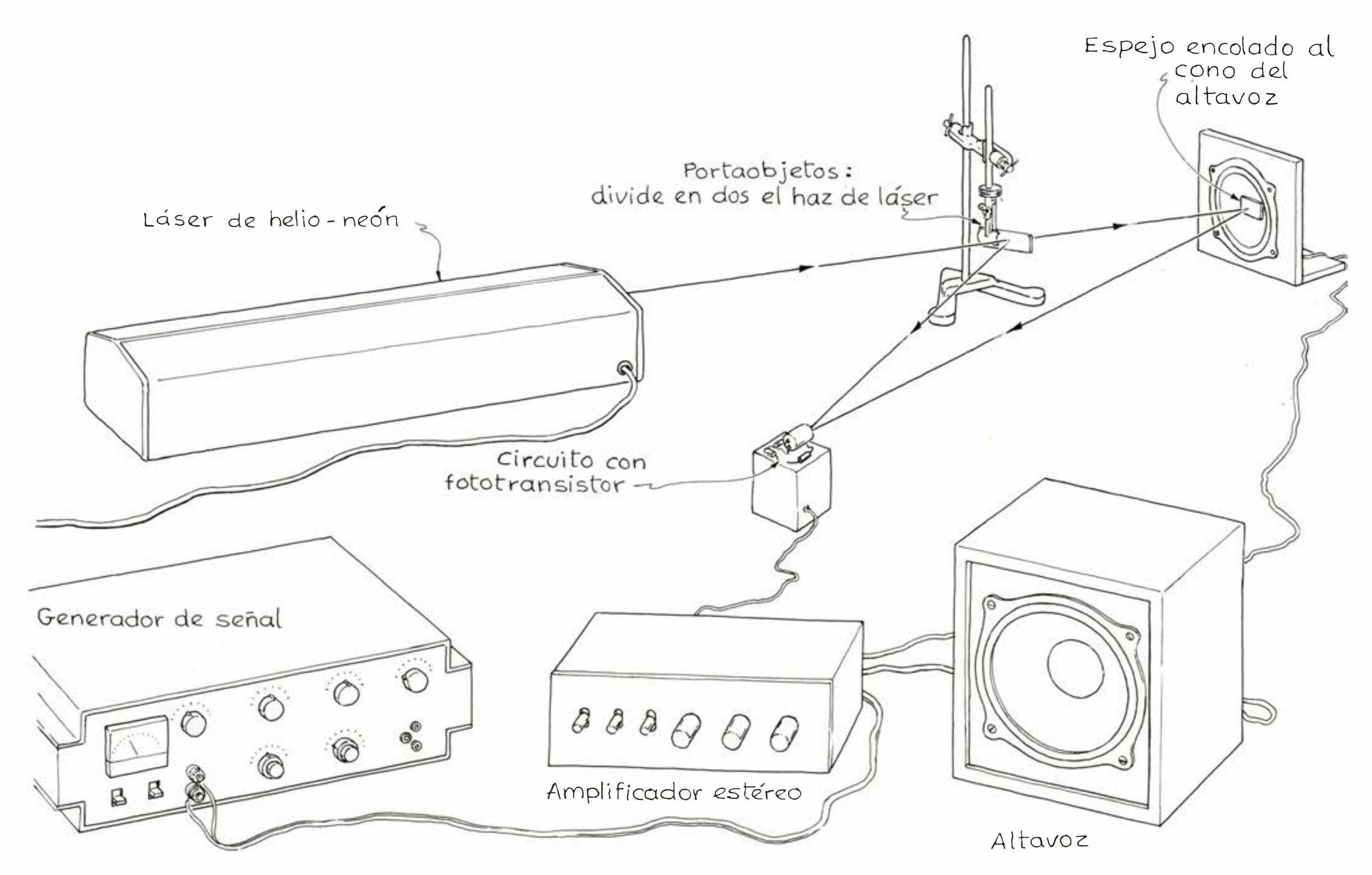
En el experimento de Crandall y Wishnow el espejo se mueve a una velocidad baja, comparada con la propia de la luz; por cuya razón el corrimiento de la frecuencia es muy pequeño. En realidad, la frecuencia se desplaza el doble, una vez porque el espejo se mueve respecto al láser y otra vez porque se mueve respecto al transistor. En el primer caso, la fuente luminosa es el láser; en el segundo, el espejo actúa de fuente (ya que emite luz) y el transistor, de observador.

Para calcular el corrimiento Doppler de la luz, hay que echar mano de la teoría de la relatividad restringida de Einstein. Ahora bien, la velocidad del movimiento oscilatorio del altavoz es tan reducida, en comparación con la velocidad de la luz, que puede hacerse un cálculo aproximado fundamentado en la física clásica. Así resulta que el corrimiento de la frecuencia vale el doble de la frecuencia no desplazada multiplicada por el cociente entre velocidad del espejo y velocidad de la luz.

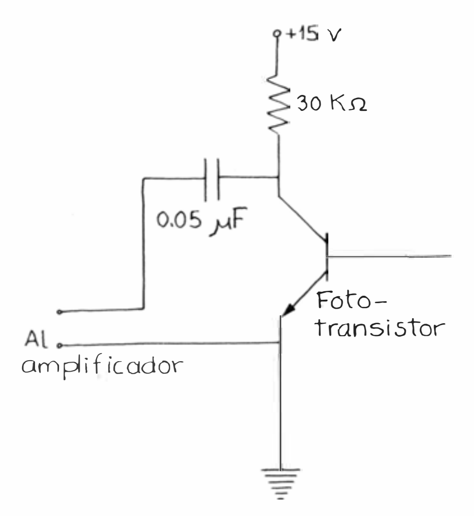
La luz que llega al transistor procedente del portaobjetos no ha sufrido desplazamiento. Pero la procedente del espejo sí, hacia frecuencias mayores o menores según sea el movimiento del espejo en el momento en que la luz lo alcanza. Esas dos señales se interfieren en el transistor y crean una frecuencia de pulsación. La iluminación neta en el transistor varía entre la interferencia constructiva y la destructiva con una frecuencia de pulsación igual a la diferencia entre la frecuencia no desplazada de luz y la desplazada. Esa pulsación la percibe el experimentador en forma de variaciones del sonido que brota del altavoz emisor. Diciéndolo de otro modo, oye un conjunto de señales sonoras que es función del corrimiento de la luz.

A finales del siglo XIX el tema de la radiación térmica planteaba un problema grave a la física. Todos los cuerpos emiten ondas electromagnéticas de acuerdo con la temperatura de su superficie. Parte de esa radiación puede encontrarse dentro de la zona visible del espectro electromagnético, por lo que puede observarse a simple vista; pero todas las superficies emiten asimismo radiación que cubre una zona mucho más ancha del espectro. Por ejemplo, un atizador que se caliente en un hogar despedirá una radiación infrarroja que podrá sentirse mucho antes de que la superficie se caliente lo bastante para despedir el consabido brillo rojo.

Armados de la termodinámica clásica y de la fresca brillantez de la teoría de la radiación electromagnética de James Clerk Maxwell, los físicos acometieron la tarea de deducir una expresión para la intensidad de la radiación térmica en función de la frecuencia. Sus repetidos esfuerzos sólo lograron aproximaciones. Para las bajas frecuencias, una expresión matemática deducida por Lord Rayleigh se acercó a los resultados empíricos; mas para las altas frecuencias esa expresión fracasó. Efectivamente, según predecía dicha expresión, la potencia radiada a alta frecuencia debía ser infinitamente grande, lo que resultaba a todas luces falso. Aquel revés matemático se conocería por catástrofe ultravioleta. Con anterioridad, Wilhelm Wien había avanzado una expresión que daba re-



1. Montaje de Richard E. Crandall para convertir en sonido el corrimiento Doppler de la luz



2. Circuito detector

sultados correctos para las altas frecuencias, aunque no valía para las bajas frecuencias.

El problema se resolvió en 1900 cuando Max Planck presentó una fórmula que concordaba fielmente con las pruebas experimentales en todas las frecuencias. En el hallazgo hubo mucho de suerte. Pasaron varias semanas antes de que Planck comprendiera por qué era válida. Como modelo teórico de superficie radiante, Planck imaginó que la radiación se debía a un gran número de pequeños osciladores, de manera tal que la intensidad de la radiación para una frecuencia determinada fuera el efecto combinado del modo en que estaban distribuidos tales osciladores. Pero lo sorprendente de ese modelo residía en que los osciladores no podían poseer una energía cualquiera, sino que la energía de cada uno de ellos estaba limitada a valores concretos que eran múltiplos enteros de uno fundamental dado por el producto de una constante (la que hoy llamamos constante de Planck, *h)* por la frecuencia *f* del oscilador.

Planck carecía de toda información acerca de la naturaleza atómica de la superficie radiante y no había tales osciladores imaginarios. Pero aquél descubrimiento trascendental le permitió sostener que la radiación térmica era función de la frecuencia. Más importante todavía, aquél trabajo de Planck anunciaba la era de la mecánica cuántica: a escala microscópica los valores de la energía quedaban limitados a determinadas cantidades discretas, múltiplos enteros de *hf*.

Aunque la constante de Planck revista un interés fundamental en la mecánica cuántica de átomos y partículas elementales, podemos medirla en un experimento sorprendentemente sencillo ideado por Crandall y su colega Jean F. Delord. El montaje consta de un filtro cromático, un detector de luz y una bombilla de 60 watt de filamento de wolframio con el vidrio no esmerilado. La luz procedente del filamento de la bombilla se filtra de modo que al detector llegue sólo una banda de frecuencias estrecha. Luego se mide la intensidad luminosa de esa banda para dos potencias de alimentación a la bombilla. Los resultados se introducen en una fórmula que proporciona un valor de la constante de Planck.

El filamento de la bombilla se calienta con el paso de una corriente eléctrica. La luz que emite comprende una banda ancha de frecuencias de las zonas visibles e infrarroja. En 1879 Josef Stefan calculó que la potencia radiada por una superficie era igual al producto de cuatro factores: (1) el área de la superficie, (2) la así llamada constante de Stefan, (3) la temperatura de la superficie elevada a la cuarta potencia y (4) cierto valor conocido como emisividad del material.

Para unos valores dados del área y de la temperatura, hay un material que, en teoría, emitiría una cantidad de energía máxima. A dicho material se le atribuye una emisividad unidad y recibe el nombre de cuerpo negro. Se trata de una materia ideal que no existe; la potencia emitida por todas las superficies reales es inferior. A cada superficie se asigna entonces una emisividad menor que 1, según la bondad de su calidad de emisor. En nuestro experimento, el filamento de la bombilla trabaja suficientemente caliente para que sea casi un cuerpo negro. Por ello, Crandall y Delord le asignan, a efectos operativos, una emisividad unidad.

En la expresión moderna de la constante de Stefan figura la constante de Planck; se la relaciona con la potencia total radiada por el filamento. Aparece asimismo en la fórmula concebida por Planck para expresar la intensidad de la luz radiada a una frecuencia dada. Para obtener un valor de la constante de Planck, Crandall y Delord realizan dos conjuntos de medidas. En cada uno de ellos, la potencia total radiada por el filamento la determinan midiendo la potencia eléctrica suministrada a la bombilla. Miden además la intensidad de la luz que atraviesa el filtro cromático. Este juego de medidas lo repiten después para otro valor de la potencia suministrada a la lámpara. Introducen los datos obtenidos en una fórmula que resulta de combinar la ley de Stefan (para la potencia radiada total) con la fórmula de Planck (que da la intensidad luminosa a una frecuencia determinada).

En la figura 3 se muestra la fórmula citada. Esta se halla afectada por un redondeo cuyo objeto es simplificar el cálculo; apenas altera la precisión con la que proporciona el valor de la constante de Planck. Las letras *I* y *P* representan la intensidad y la potencia que miden Crandall y Delord en su experimento. La fórmula requiere asimismo un valor para la velocidad de la luz, que es de 3×10^8 metros por segundo. La letra *f* simboliza la frecuencia de la luz que deja pasar el filtro. Este, en realidad, no deja pasar una sola frecuencia, sino una banda estrecha de ellas, pero se toma el valor situado en el centro. Con una banda más estrecha, la aproximación introduciría menos error.

La letra *A* que aparece en la fórmula designa la superficie del filamento. Para medirla, Crandall y Delord proyectan una sombra de éste sobre una pared. Luego miden las dimensiones de esa imagen y las reducen a la escala que supone la ampliación de la proyección. La ampliación puede determinarse fácilmente colocando una regla junto a la lámpara y midiendo su imagen sobre la

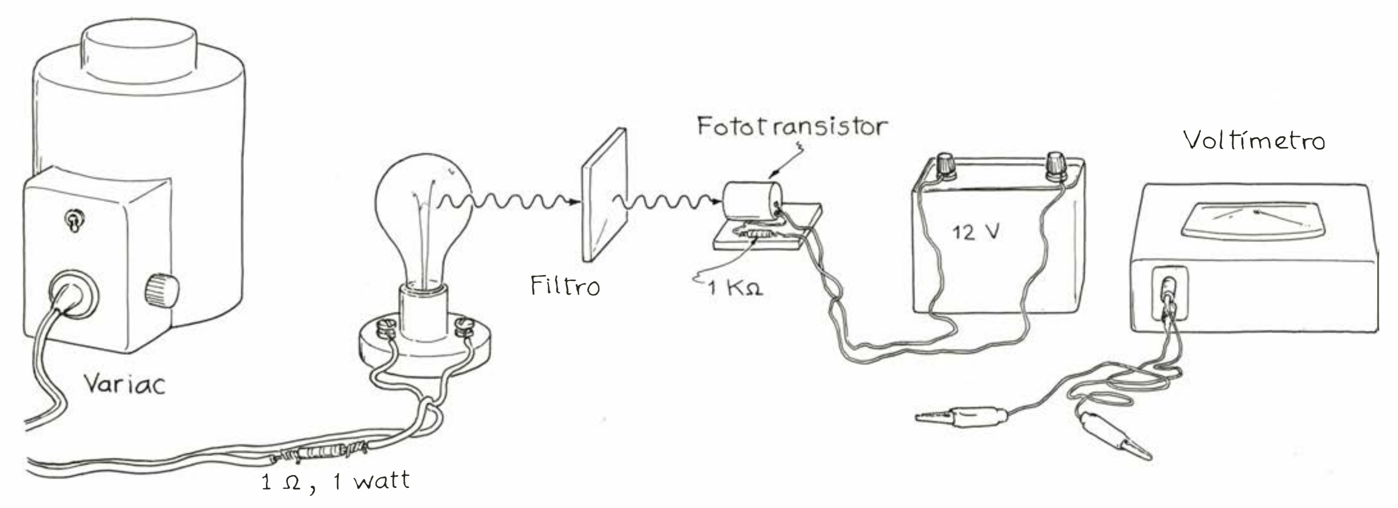
Ley de Stefan —— $P = \epsilon A \sigma T^4$

Constante de Stefan —— $\sigma = \dfrac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c^2}$

Fórmula de Planck —— $I = \dfrac{N f^3}{\exp(hf/kT) - 1}$

Fórmula aproximada para determinar la constante de Planck —— $h \simeq \dfrac{15 c^2}{2\pi^5 A f^4} \cdot \dfrac{P_1 P_2}{(P_1^{1/4} - P_2^{1/4})^4} \cdot \mathrm{Log}^4 \left(\dfrac{I_1}{I_2}\right)$

3. Fórmulas para determinar la constante de Planck



4. Cómo medir la constante de Planck, según Crandall

pared. En su experimento, el valor de A resultó ser de $5{,}2 \times 10^{-5}$ metros cuadrados.

Para graduar la potencia suministrada a la lámpara se sirven de un Variac (nombre comercial de un autotransformador de relación variable). Para calcular la potencia, miden la tensión en la resistencia de 0,1 ohm en serie con la bombilla. Esa tensión dividida por la resistencia da la intensidad de la corriente eléctrica que atraviesa dicha resistencia y también el filamento.

Seguidamente miden la tensión en la bombilla. Esta tensión multiplicada por la intensidad de la corriente es la potencia suministrada a la bombilla. Según Crandall, si no se dispone de un Variac, éste puede reemplazarse por una batería de 12 volt, pero en tal caso habrá que ajustar la corriente con una resistencia conveniente al objeto de suministrar a la bombilla dos niveles de potencia.

El filtro instalado entre la bombilla y el fotodetector es de celofán verde adquirido de Corion Instruments, Inc. (73 Jeffrey Avenue, Holliston, Mass. 01746). La frecuencia introducida en el cálculo de la constante de Planck fue de $5{,}3 \times 10^{14}$. De otras firmas de material científico pueden obtenerse filtros similares y puede trabajarse con otros colores. La banda de frecuencias, o sea, la gama de frecuencias que deja pasar el filtro, debe ser lo más estrecha posible, pero incluso un filtro barato sirve para determinar un valor muy aceptable de la constante de Planck.

El circuito detector se compone de un fototransistor, una resistencia de 1000 ohm y una batería de 12 volt. La respuesta espectral del fototransistor carece de importancia, pues la frecuencia de la luz que lo ilumina no varía. La intensidad de la corriente que atraviesa el circuito detector se determina midiendo la caída de tensión en la resistencia. Pero no es necesario que la intensidad de corriente se pase a unidades de intensidad luminosa, ya que en la fórmula sólo participa un cociente de dos intensidades y, por ello, los factores de conversión desaparecen.

Crandall me ha proporcionado los siguientes datos a título de ejemplo. Con una potencia de 19,3 watt consumida en la bombilla, la corriente de detección tenía una intensidad de 0,81 miliampère. Cuando la potencia consumida subió a 36,5 watt, la intensidad de la corriente cambió a 7,57 miliampère. A partir de esos datos, Crandall y Delord calcularon una constante de Planck de $4{,}9 \times 10^{-34}$ joule-segundo, valor bastante próximo al normalmente aceptado de $6{,}6 \times 10^{-34}$ joule-segundo. La desviación se debe a que la banda de frecuencias del filtro es finita y a que la emisividad del filamento no es exactamente 1.

De las distintas fuerzas fundamentales del universo, la más patente en nuestra vida cotidiana es la de gravitación. Percibimos la atracción gravitatoria sobre nuestros cuerpos porque la masa de la Tierra es muy grande. Pero la atracción gravitatoria que se ejercen una pareja de objetos cualesquiera de nuestro entorno es tan pequeña que pasa inadvertida, pues es largamente superada por otras fuerzas mucho mayores, tales como el rozamiento.

¿Cómo poner de manifiesto y medir en un laboratorio la fuerza gravitatoria entre dos masas? Henry Cavendish fue el primero en abordar el tema en 1798. Su montaje experimental consistía en un brazo de madera de unos 180 centímetros de longitud, suspendido horizontalmente mediante un alambre delgado. En cada extremo del brazo fijó una bola de plomo de unos cinco centímetros de diámetro. La suspensión mostraba una extrema sensibilidad a toda fuerza tendente a rotar el brazo en torno al alambre de suspensión.

Para materializar tal fuerza, a una de las bolas montadas en el brazo se acercaba una tercera bola de plomo, cuya atracción gravitatoria sobre la primera ejercía una fuerza tendente a rotar el brazo en torno al alambre de suspensión. Para acrecentar dicha fuerza, acercaba, a la bola del otro extremo del brazo, una cuarta bola por el otro lado del dispositivo.

Cavendish puso buen cuidado en proteger el montaje de las corrientes de aire. Además, para que la masa de su propio cuerpo no influyera en la experiencia, preparó un dispositivo de mando a distancia para manejar las bolas tercera y cuarta. Medía el ángulo de rotación observando un haz luminoso que se reflejaba en un espejo solidario del alambre del que colgaba el balancín.

Con las bolas de plomo tercera y cuarta en situación, la barra rotaba levemente hasta que el momento resistente del alambre retorcido contrarrestaba la atracción gravitatoria. Se medía esa posición de equilibrio. Luego, las bolas tercera y cuarta se colocaban nuevamente de modo que ejercieran fuerzas en sentidos contrarios y volvía a medirse el ángulo de equilibrio. La diferencia entre los ángulos de cada posición se dividía por dos con el propósito de obtener una medida exacta de la rotación en cada caso.

Con tales números, Cavendish calculó la intensidad de la fuerza gravitatoria entre cada par de bolas situadas en el extremo de la barra. Desde Isaac Newton se conocía la expresión matemática de la fuerza gravitatoria entre dos ma-

sas. La intensidad de dicha fuerza es directamente proporcional a las masas que se atraen e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. En la expresión matemática aparece, asimismo, un factor de proporcionalidad llamado constante de gravitación. A Newton le importunaron mucho sobre la forma de determinar tal constante, pues su única prueba de la existencia de la gravitación no se basaba en otra cosa que en un objeto de enorme tamaño cuya masa no se conocía bien (tal es la Tierra). El atractivo e interés del experimento de Cavendish radicaba en que se basaba en masas mucho más pequeñas que podían medirse fácilmente. Cavendish calculó para la constante de gravitación un valor de $6{,}754 \times 10^{-11}$ $N(m^2/kg^2)$, muy próximo al actualmente aceptado de $6{,}668 \pm 0{,}005) \times 10^{-11}$ $N(m^2/kg^2)$. (*N* representa newton, *m* metro y *kg* kilogramo).

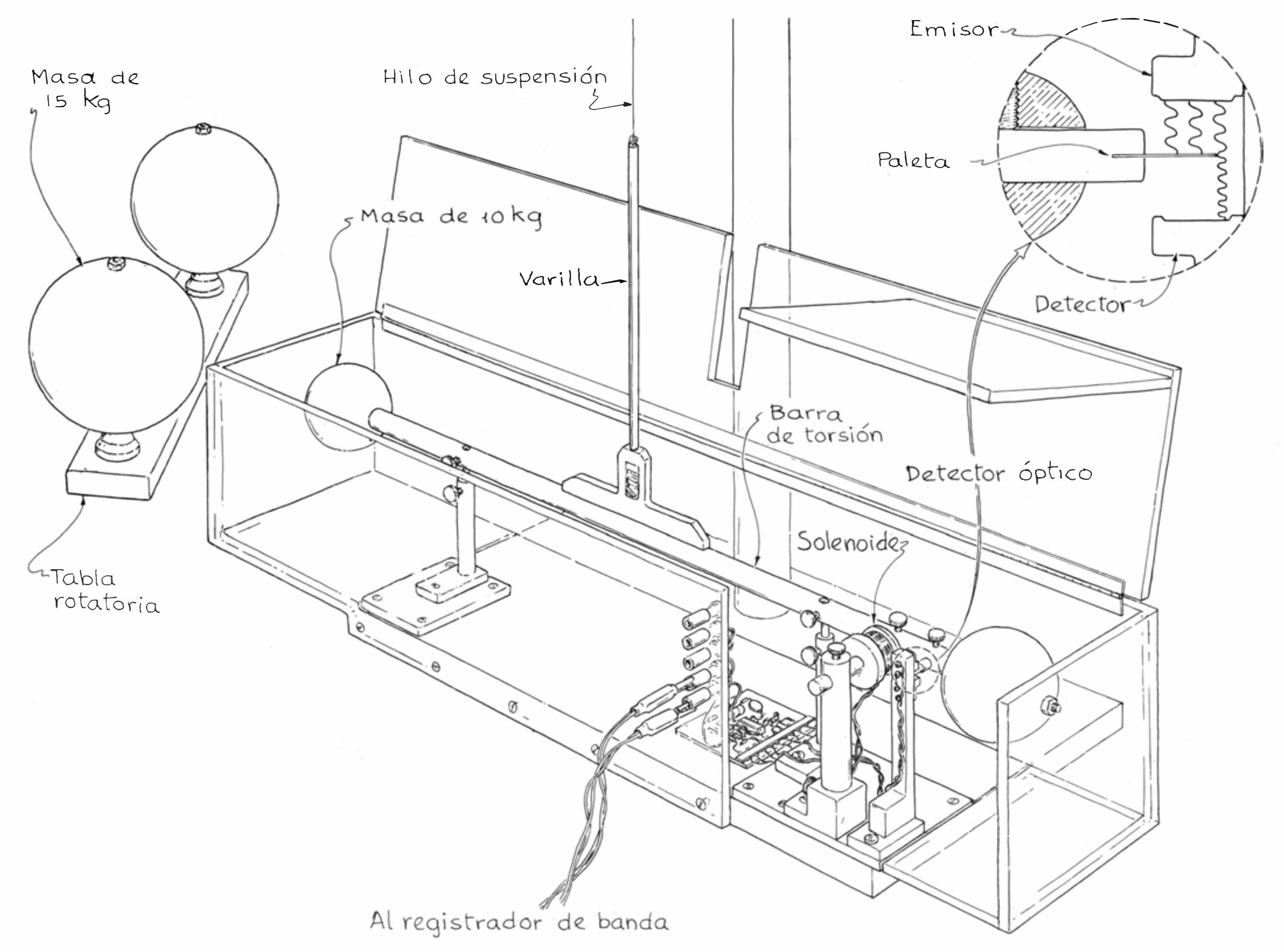
El experimento de Cavendish no es una demostración habitual en física, por su minuciosa laboriosidad. La barra necesita un buen rato para inmovilizarse en su posición de equilibrio y toda perturbación procedente del entorno (por ejemplo, del movimiento del experimentador por el laboratorio) supone un alargamiento del tiempo de asentamiento. Un ensayo semejante consume horas interminables. Trabajando sobre un prototipo construido por Greg Eibel, del Reed College, Crandall ha ideado una ingeniosa versión electrónica del experimento de Cavendish que dura sólo unos minutos y proporciona un valor para la constante de gravitación cifrado en $(7{,}5 \pm 1{,}5) \times 10^{-11}$ $N(m^2/kg^2)$.

En tanto que el experimento clásico de Cavendish se apoyaba en la rotación de una barra, el de Crandall se basa en impedir tal rotación. En este caso, la intensidad de la fuerza gravitatoria se mide a través de la fuerza magnética necesaria para impedir la rotación de una barra de torsión cuando se acerca a ésta otra masa. Un sensor o captador óptico registra entonces la posición de la barra.

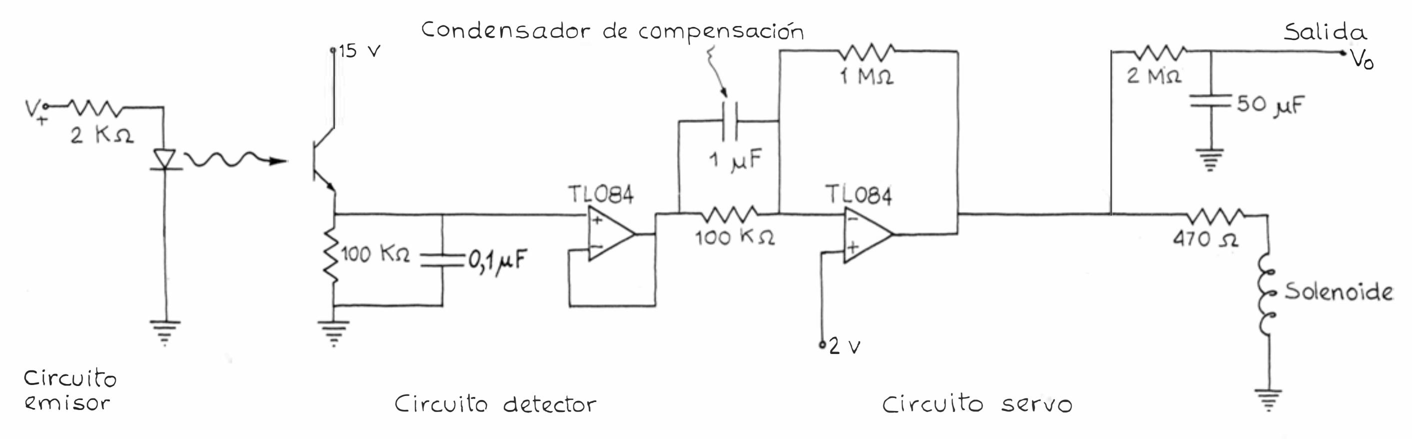
Cuando la masa adicional se aproxima a una de las montadas en la barra, el inicio de la rotación dispara un servomecanismo que ejerce sobre la barra una fuerza magnética suficiente para detener el movimiento. Graduando el servomecanismo, mide Crandall la atracción gravitatoria que sufre la masa montada en la barra. Un experimento completo puede durar sólo unos 20 minutos.

La barra pende de un trozo de cuerda de piano que desciende desde un soporte asido al techo hasta un vástago rígido unido al centro de la barra. Aunque no es imprescindible, el vástago contribuye a amortiguar las vibraciones de la cuerda. En ambos extremos de la barra se montan masas de 10 kilogramos, al igual que en el dispositivo clásico. Y junto a uno de los extremos se encola un imán dentro de un agujero que atraviesa la barra. En cuanto ésta empieza a rotar, un solenoide del servomecanismo atrae magnéticamente el imán y tiende a anular el giro.

El captador óptico se compone de un emisor infrarrojo y un detector infrarrojo que se instalan junto al extremo de la barra provisto del imán. En la figura



5. Mecanismo de Crandall para medir la constante de la gravitación universal



6. Circuito para el experimento relativo a la gravedad

6 se muestra el esquema eléctrico del dispositivo. El emisor es un diodo simple que radia una pequeña cantidad de calor cuando lo atraviesa la corriente procedente de una fuente de alimentación de tensión constante. El detector es un transistor cuyas características eléctricas varían en presencia de calor.

Entre el emisor y el detector se sujeta una paleta de tal modo que, inicialmente, apantalle al detector de la mitad de la radiación. Entonces, cuando la barra comienza a girar en un sentido, el detector queda más al descubierto y el servomecanismo actúa tendiendo a devolver la barra a su orientación original. Con la rotación en el sentido contrario, se apantalla una mayor porción del detector y también entra en acción el servomecanismo.

La señal de salida del detector atraviesa un circuito constituido por dos amplificadores operativos y otros elementos. El sistema está continuamente comparando la señal del detector con una tensión de referencia de dos volt. Si la barra está en posición de equilibrio y la paleta protege del emisor infrarrojo a medio detector, la señal de salida de éste igualará a la de referencia. Pero si la barra gira y descubre una mayor porción del detector, se destruirá la igualdad entre ambas señales y el sistema enviará una corriente a través del solenoide, generando éste un campo magnético que atraerá al imán sujeto a la barra. La intensidad de la corriente de correción necesaria se lee indirectamente, a partir de la variación de la tensión de salida (V_0 en la ilustración), que aparece en un voltímetro o en un registrador de banda.

La primera operación para graduar el dispositivo es la de calcular la constante de torsión de la cuerda de piano de la que cuelga la barra. Cuando ésta gira cierto ángulo, el hilo metálico, al retorcerse, produce un momento de torsión resistente igual a su constante de torsión multiplicada por el ángulo de rotación. Para calcular esa constante, Crandall determina dos valores numéricos. Con el servomecanismo desconectado hace que la barra oscile en torno a su posición de equilibrio y mide el período de oscilación. Este tiempo se llama período natural de la barra. Seguidamente, calcula el momento de inercia de la barra (respecto al punto de suspensión). Podemos deducir la constante de torsión del hilo metálico mediante la fórmula $k = I(2\pi/P)^2$, donde k es la constante de torsión, I el momento de inercia y P el período natural.

En la operación siguiente se relaciona la tensión de salida del servomecanismo con el momento de giro actuante en la barra. Con el servomecanismo conectado, se hace girar un ángulo prefijado el soporte del hilo de suspensión para retorcerlo. La barra no se mueve, impedida por la atracción magnética del solenoide. Entonces, la tensión de salida del circuito cambia de valor. Esta variación se divide por el ángulo de torsión y la constante de torsión: da lo que Crandall llama ganancia torsional del dispositivo. El resultado, un coeficiente (volt por unidad de momento de giro), le permite convertir la tensión de salida, medida durante cada experiencia, en el valor del momento de giro que actúa en la barra en virtud de la atracción gravitatoria ejercida sobre uno de los extremos de la misma.

Por ejemplo, cuando una masa de 15 kilogramos roza casi una de las masas de la barra, la tensión de salida varía en unos 25 milivolt. La intensidad de la fuerza que sufre la masa montada en la barra se calcula multiplicando la variación de la tensión de salida por la mitad de la longitud de la barra y dividiendo por la ganancia torsional. La constante de gravitación se obtiene introduciendo esta fuerza en la fórmula que expresa la ley de Newton, junto con la distancia entre los centros de la masa de 15 kilogramos y de la masa montada en la barra.

Para facilitar la introducción de la masa suplementaria, Crandall emplea a veces una tabla giratoria con una masa de 15 kilogramos montada en cada extremo. Su funcionamiento es más o menos como el de las bandejas giratorias para servir comidas que en Norteamérica llaman *lazy Susan.* Rotando la tabla en un sentido, se acerca una de las masas a un costado de una de las masas montadas en la barra. Esta se ve atraída hacia la masa suplementaria, pero el servomecanismo impide que ésta apenas se mueva. Cuando la tabla gira en el otro sentido, al costado opuesto de la masa montada se acerca la otra masa de 15 kilogramos.

El tiempo de asentamiento del dispositivo lo establece el condensador de compensación, que es del orden de un microfarad. Cuando Crandall acerca una masa de 15 kilogramos a uno de los extremos de la barra, la variación de la tensión de salida tarda en manifestarse unos dos o tres minutos escasos. Tal rapidez en la respuesta hace que la versión de Crandall del experimento de Cavendish sea idónea para experiencias de cátedra; una medida exacta de la constante de gravitación precisa únicamente de unos 20 minutos de observaciones.

Por su trabajo acerca de la constante de gravitación, Crandall ganó en 1981 la Apparatus Competition de la Asociación Americana de Profesores de Física. Este experimento y el que sirve para medir la constante de Planck aparecerán próximamente en el *American Journal of Physics,* donde se ha publicado ya el relativo al efecto Doppler en la luz. Bruce Eaton, colega de Crandall, ha contribuido con sus ideas a alguno de estos proyectos.

Libros

Medidas, clásicos de la física contemporánea, acuicultura española y psicología matemática

Gabriel Lorente, Luis Alonso, Emilio Pascual y O. León García

La Medida en las Ciencias Naturales, por Miguel Aguilar. Editorial Rialp; Madrid, 1982. El conocimiento que alcanzamos de la naturaleza se consolida y se aquilata cuando nos encontramos en condiciones de efectuar determinaciones cuantitativas de las realidades del mundo físico, o sea, cuando somos capaces de *medirlas*. Sin mediciones la ciencia y la tecnología carecerían de consistencia. Una cuota importante de los afanes del biólogo, del astrónomo, del médico, del ingeniero y del físico se invierte en la tarea de realizar medidas o en la de extraer consecuencias de las ya efectuadas. El interés por la cuantificación de los contenidos se ha extendido –muy justificadamente– en nuestros días a nuevas áreas del saber, cual pueden ser las diferentes ciencias del hombre en su ser individual (antropología y psicología) y en su dimensión social (sociología y política). Disciplinas antaño asistidas tan sólo con los recursos del discurso conceptual literario. Son infundados, a mi entender, los recelos que esta nueva metodología despierta en quienes temen una "materialización" de las realidades humanas: antes al contrario, la gradación de las realidades en forma cuantificable y numerable constituye una profundización en el conocimiento de un asunto.

La ciencia y arte de medir dimanan de profundos conceptos, que se sustancian en la filosofía de las ciencias y en la epistemología y simultáneamente requieren el apoyo de una complicada instrumentación y de una depurada tecnología. No sería exagerado afirmar que la ciencia de la medida es el soporte de toda ciencia de la naturaleza y al mismo tiempo su culminación; clave para penetrar en el mundo y tesoro de hallazgos.

A este asunto ha dedicado muchos desvelos el físico español Miguel Aguilar Gutiérrez que como fruto de ellos ofrece la pulcra, atractiva y estimable obra que aquí reseñamos. En ella y después de una primera parte dedicada a un análisis de índole general relativo al concepto de medida, a los procesos generales y a los errores, se pasa a ofrecer, en la segunda parte, una exposición detallada de la forma de efectuar la medida de las magnitudes básicas, a saber: longitud, ángulo, tiempo y frecuencia, masa, intensidad de corriente eléctrica, temperaturas y calor, intensidad luminosa. En el recuento se recogen procedimientos clásicos junto a métodos modernos. Así por ejemplo, en relación con la determinación de la longitud se describe el viejo nonius, pero también se explican los interferómetros y las medidas de longitudes por radar. En relación con la determinación del tiempo se informa sobre la construcción y funcionamiento del clásico reloj de pesas, pero a continuación se da cuenta del fundamento del reloj de cuarzo y del mucho más alambicado reloj de cesio. En relación con la medida de tiempos el lector encontrará unas sugestivas páginas sobre la datación arqueológica y geológica. La medida de la temperatura es tratada con especial cuidado, registrándose numerosos sistemas. En el caso de la intensidad luminosa, se hace caso omiso de los fotómetros de comparación tradicionales y se centra la atención, plausiblemente, en los sistemas fotovoltaicos y fotorresistivos. Por lo que se refiere a la medida de la corriente eléctrica, se describen los instrumentos clásicos con cierto detenimiento y sólo se hace una sucinta alusión a los multímetros electrónicos de presentación digital de la medida. Como tercera parte de la obra se ofrece una miscelánea o repertorio de procedimientos de medida de diversas magnitudes derivadas, cuya selección parece haber estado inspirada en el deseo de poner de relieve cómo en los campos más dispares de la ciencia de la naturaleza es necesario realizar mediciones y cuál es su forma de realizarse.

Reciben en esta parte dilatado tratamiento los procedimientos de medición de magnitudes definitorias de los medios fluidos, ya en reposo ya en movimiento, entre los que se consideran con detenimiento los referentes a la presión, tanto cuando esta es superior a la atmosférica, como cuando es inferior (vacío). Hay una exposición de corte clásico relativa a la medición de impedancias y otras magnitudes eléctricas, y está también en la línea de los contenidos recibidos la metrología de los procesos radiactivos. Finaliza el libro con unas curiosas páginas dedicadas a explicar la forma de determinar la contaminación ambiental.

Para alcanzar una buena comprensión de los contenidos de esta obra el lector habrá de hallarse en posesión de conocimientos de física equivalentes a los que adquiere un alumno aventajado de la asignatura de física general, propia del primer curso de las facultades de ciencias y escuelas de ingeniería. Dado el carácter sucinto y condensado de la exposición, se exige al lector que posea con gran claridad y seguridad las ideas básicas sobre conceptos, leyes, aparatos y fenómenos físicos fundamentales; en caso contrario podrá encontrar dificultades en la comprensión de algunas páginas. En ocasiones se suministra, en apéndices o apartados complementarios, los fundamentos teóricos de un determinado método. No aparece con claridad el criterio seguido para discriminar las materias en las que se explican las bases teóricas de aquellas otras en que se dan por sabidas, remitiéndose a las obras generales de física o a los conocimientos del lector. Como ejemplo de lo dicho, puede anotarse que desconocemos por qué se expone la teoría del movimiento oscilatorio, al hablar de los relojes, y no se da cuenta de la ecuación de Bernoulli al mencionar los venturímetros. Me parece advertir también cierta indefinición al fijar los niveles de conocimiento del destinatario de la obra. Porque hay páginas inasequibles para un novel, mientras que otras son triviales para el profesional y el experto.

La presentación de la obra es muy cuidada en su redacción, confección, tipografía e ilustraciones. La información gráfica vale por muchas palabras y es muy atrayente. Hay que deplorar la ausencia de un índice analítico y de otro onomástico, especialmente útiles en una obra como ésta de cierto carácter de enciclopedia o repertorio, en la que, para decirlo en otros términos, lo concreto y singular prima sobre lo sistemático. Es encomiable la acumulación de información encerrada en un volumen de poco más de 200 páginas. Se mencionan a veces los antecedentes históricos, dosificándolos con oportuna sobriedad.

En mi opinión una obra sobre medida no debería ignorar los nuevos sistemas de presentación de resultados ("display methods"), dado que éstos

condicionan con frecuencia las técnicas de medición y la naturaleza de los ingenios medidores. No se olvide que los resultados de una medición han de llegar al observador a través de un cauce sensorial, que es generalmente visual. Hasta tiempos recientes el sistema casi exclusivo consistía en establecer correspondencia entre la posición de algún índice, marca o tope correlativos con la medida y algún tipo de regla o escala graduada fija. En relojes, balanzas y reglas de medir opera un procedimiento de esta índole. Pero asistimos a un florecimiento de nuevos modos de ofrecer la medida de las variables, gracias sobre todo a los tubos de rayos catódicos, a los registradores de aguja y a los sistemas electrónicos de presentación de datos en forma digital. Los nuevos procedimientos de visualización generan modificaciones en los elementos básicos de captación de la variable sometida a medida y en mayor grado sobre la cadena de procesos intermedios que se inicia en la magnitud a determinar y acaba en la visualización final. Proceso que generalmente implica la transformación de la magnitud mensurada en una "señal" o variable eléctrica modulada. Con frecuencia el efecto de la operación medidora se destina a ser impreso o grabado en algún soporte material que posteriormente utilizará el observador humano, o será procesado o servirá de elemento determinante y especificativo de un proceso de control.

Reconociendo que la intrínseca limitación de cualquier libro impone al autor muchas renuncias y le obliga a seleccionar los contenidos, me parece que no puede hoy ofrecerse una visión panorámica del mundo de la medida sin mencionar los sistemas de presentación de datos, de registro y de control. Sistemas que afectan con frecuencia a la misma esencia de los métodos y de los instrumentos de medida. Por citar un solo ejemplo, un osciloscopio, cuyo protagonismo en las mediciones es hoy tan acusado, no sólo es un presentador de información, sino al mismo tiempo, y entre otras muchas cosas, un reloj y un frecuencímetro y su uso ha revolucionado el mundo de la medición. Puede ser disculpada tal vez esta apreciación personal por el hecho de que cuando en el curso académico 1972-73 se me invitó por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid a impartir una asignatura de doctorado, dejando el temario a mi elección, opté por ocuparme del mundo de la medida, eligiendo como título para mi curso: "Medición y registro tecnológico de variables físicas". Se agregó el calificativo "tecnológico" para armonizar más con la índole del centro. También como estimación muy personal deploro la ausencia, en las referencias bibliográficas, de la obra *Análisis dimensional,* debida al ingenio y a la pluma de Julio Palacios, uno de los grandes maestros de la física en la España contemporánea. Evoca para mí esta obra recuerdos de un curso de doctorado dirigido por él sobre este tema y los encendidos debates que aquel maestro de científicos suscitaba y en los que participaba activamente, no como imparcial moderador, sino como apasionado polemista.

El perfil del beneficiario de esta obra de Aguilar es múltiple. El alumno de facultades de ciencias y escuelas de ingeniería encontrará en ella información muy valiosa para fundamentar los preceptivos trabajos prácticos de laboratorio. El estudioso y el curioso de la ciencia y la técnica, en cualquier grado y modalidad, se sentirá atraído por asunto tan medular para la ciencia y guiado por este hilo conductor revisará y afianzará sus conocimientos, contribuyendo poderosamente a este efecto la excelente presentación y el poderoso atractivo de la obra que comentamos. No debe desdeñarse el valor didáctico que posee la nucleación de los contenidos de una rama del saber en torno a un tema monográfico, sistema cuya fuerza motivadora para la atención es con frecuencia mayor que la exposición sistemática de una disciplina; procedimiento que, por otra parte, es inexcusable en ciertas etapas del aprendizaje. El profesor de ciencias hallará en esta obra un rico repertorio de noticias importantes y curiosas con las que ilustrar sus lecciones y añadir amenidad y atractivo a sus exposiciones. Para el profesional de la investigación y de la tecnología la obra contiene información valiosa y funcional y múltiples sugerencias para el momento de resolver los problemas de medición que puedan surgir, tomando como punto de partida los sistemas ya descubiertos.

En definitiva, una estimable aportación a un área fecunda de la ciencia y de la tecnología, digna de ser cultivada por sí misma, por sus aplicaciones y por su carácter estimulante en los avances técnicos y científicos. Como acertadamente asegura el autor en el prólogo "nuevos descubrimientos científicos producen nuevas tecnologías y nuevos aparatos de medida. Estos, a su vez, permiten explorar más a fondo campos de la ciencia, haciéndola avanzar nuevamente". (G. L.)

FONDAMENTI DI MECCANICA RELATIVISTICA, por Tullio Levi-Civita. Escritos por Enrico Persico. Epílogo de Tullio Regge. MOLECOLE E CRISTALLI, por Enrico Fermi. Publicados ambos por la editorial Zanichelli, Bolonia 1982. En su discurso de ingreso en la Real Academia Española de la Lengua, ocupando el sillón que dejaba vacante Santiago Ramón y Cajal, razonaba así Blas Cabrera Felipe el origen de la penuria de nuestra física: "La falta radical de tradición española en las ciencias físicas se explica recordando que su nacimiento ocurrió justo en el momento en que nuestras energías habían sido agotadas por la intensa vida de los primeros siglos de la edad moderna".

¿Ocurrió lo mismo en la renovación de esta rama, a principios de nuestro siglo, con la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad? Evidentemente, no del todo si aceptamos el juicio de J. H. van Vleck: "En la historia del paramagnetismo se recordará a Blas Cabrera como el físico que hizo los experimentos correctos en el momento justo". El Laboratorio de Investigaciones Físicas y el Laboratorio Matemático de la Junta para Ampliación de Estudios reunían un plantel cuya ponderación encomiástica no viene a cuento, cuyo mejor tributo sería publicar sus trabajos, a imagen de estas dos reproducciones anastáticas italianas.

La historia reciente de la física teórica exige un esfuerzo y una preparación distintos de los que se requieren para otras épocas. Pero no exime su dedicación. Y que se nos alcance, sólo existe un departamento universitario, el de física teórica de la Universidad Autónoma de Barcelona, que trabaje en esa línea: ningún centro del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, ninguna revista, ninguna colección de libros. A propósito del centenario de Einstein, se escribió, acá y acullá, de su estancia en España, de si lo recibió fulano o mengano. Lo mismo podría decirse de Langevin, Volterra, Curie, Weyl y Schrödinger. Pero nada se nos comenta de la razón de su visita, de las discusiones académicas e intercambio de ideas, de las "huellas" que dejaron.

Porque alguna dejaron. Tullio Levi-Civita trabó conocimiento con Esteban Terradas en Cambridge en 1912. En 1921 vino a Barcelona a dar unas conferencias sobre mecánica clásica y relativista. A lo largo de esos nueve años se había ido estrechando una comunicación regular a través de un constante intercambio epistolar (del que se han ocupado Thomas F. Glick y Antoni Riera). La influencia de Levi-Civita se extiende a Madrid. F. Lorente de No se convierte en su expositor, y, por supuesto, Terradas. "El señor Terradas resumió el cursillo del profesor T. Levi

Civita en el Seminario de Hamburgo, acerca de invariantes adiabáticos. Hizo breves consideraciones acerca del problema de la cuantificación de sistemas físicos, especialmente de sistemas atómicos obtenidos, aplicando a imágenes planetarias de los mismos las leyes de la Dinámica. Hizo patente la dificultad física de hallar a qué elementos debe aplicarse la cuantización, y cómo parece ser una regla empírica adecuada el cuantizar expresiones que durante el movimiento permanezcan invariantes, aun a pesar de variaciones lentas de determinados parámetros, como la temperatura, la masa, etc. Pero para poder aplicar esta regla o pauta de cálculo, hace falta conocer los invariantes adiabáticos de un sistema, lo que no parece tarea fácil sino en los casos, relativamente muy sencillos (y previstos por Levi Civita en otro trabajo de los *Mathematische Annalen*), en que pueden separarse las variables en la ecuación de Jacobi y en que la aplicación del método de la integral completa permite reducir el problema a cuadraturas. Expuso también el señor Terradas que el profesor Levi Civita ha hecho aplicación de la teoría de invariantes integrales a algunos problemas de Astronomía, especialmente al problema de los dos cuerpos con masas variables lentamente (por la radiación o por la lluvia de meteoritos), resultando de una sencillísima aplicación de la invariancia adiabática del referido volumen que, por ejemplo, si la masa crece sin límite, al cabo de un tiempo indefinidamente grande, acabarán por chocar los dos cuerpos en el supuesto de ser monótono el crecimiento de la masa. Otras consecuencias sacó Levi Civita de la misma teoría, v. gr., acerca del período de las rotaciones, que tiende a ser el de la traslación relativa; resultados todos ellos que, por referirse a valores del tiempo grandes, tienen un interés de primer orden en tan interesante análisis, en el que apenas nos es dado entrever la trayectoria y el movimiento en la inmediación del punto donde se considere en un momento dado." (*Memoria de la Junta de Ampliación de Estudios e Investigaciones Científicas, correspondiente a los cursos 1928-29 y 1929-30*; Madrid, 1930; págs. 273-274.)

Tullio Levi-Civita nació en Padua en 1873. Allí fue alumno de Giuseppe Veronese y Gregorio Roca-Curbastro, y se doctoró con una tesis sobre las invariantes absolutas. Enseñó en Bolonia, Pavía, Padua y Roma; por su ascendencia judía hubo de abandonar la cátedra en 1938. Murió en Roma en 1941.

La teoría general de la relatividad, si la comparamos con lo que ocurriera con la teoría de la relatividd especial, no preocupó sobremanera a los físicos, y Einstein hubo de enfrentarse solitario, en un comienzo, al problema. Pero encierra una complejidad matemática muy superior a la involucrada en la relatividad especial y requiere el uso del "análisis tensorial", desconocido en aquel entonces (1914) por la mayoría de los físicos. Si no hubiera sido por Grossmann, quien le introdujo en las obras de Levi-Civita, el propio Einstein se hubiera visto bloqueado.

Los *Fundamentos de mecánica relativista* publicados en 1928 fueron –y continúan siendo– una lúcida introducción a la teoría de la relatividad general, cuyos postulados se reconstruyen inductivamente como modificaciones de la mecánica clásica. Tullio Regge cierra la obra con un extenso apéndice sobre el transporte paralelo de Levi-Civita y sus generalizaciones. En su forma original se recurrió al transporte paralelo para unificar y simplificar el cálculo diferencial absoluto, confiriendo al mismo una interpretación geométrica intuitiva.

En varios frentes sobresalió Enrico Fermi: elaboración de la electrodinámica cuántica relativista, la estadística cuántica, desintegración nuclear beta. Tenía el don de ver el "sentido físico" de las expresiones matemáticas más complejas. Trascendía el puro formalismo para no perder de vista de qué se estaba hablando y comunicárselo a sus discípulos, que fueron escuela: Amaldi, d'Agostino, Rasetti, Pontecorvo y Segré. Un grupo discreto y eficaz más conocido en su tierra que, en España, nuestros físicos contemporáneos: Cabrera, Velayos, Palacios, Batuecas, Catalán, Moles. La lección, una vez más, que hemos de sacar, de la edición facsímil de esta obra de 1934, traducida al alemán en 1938 y en 1966 al inglés, es la de permanencia de los pilares de la física contemporánea, cuyo manejo se hace imprescindible para entender los desarrollos actuales.

La aventura de Fermi es arquetípica del científico del siglo XX. Nacido en 1901, se recibe de doctor a los 21 años. Trabaja con Born y Ehrenfest. Antes de cumplir los veinticinco, desarrolla la que se llamaría estadística Fermi-Dirac. No se cierra en un tema, como vimos más arriba. En 1938 se le otoga el Nobel por el descubrimiento de nuevos elementos radiactivos producidos por irradiación de neutrones y por el descubrimiento de reacciones nucleares inducidas por neutrones lentos.

Moléculas y cristales aborda las aplicaciones de la mecánica cuántica al estudio del enlace químico en las molé-

culas, algunas características de los sólidos cristalinos y las propiedades estadísticas de los gases. (L. A.)

Posibilidades de la Acuicultura en el Litoral Español, por J. Ignacio Arnal. Set Ediciones, 1982. La acuicultura marina ha despertado en los últimos años un gran interés en nuestro país, tanto en los medios científicos como en el sector empresarial. Fruto de este último es el libro que nos ocupa, que representa el informe elaborado por un biólogo merced a la ayuda concedida por un grupo de empresas.

Los cultivos marinos son enfocados de muy distinta manera en medios científicos, políticos y empresariales. Investigadores de gran prestigio en el campo de las ciencias marinas opinan que carece de interés la producción de unas cuantas toneladas de mariscos y peces de alto precio, desde el punto de vista de la producción de proteínas para la alimentación humana. Otros, quizá con más entusiasmo que prestigio, ven en el interés por la acuicultura la posibilidad de disponer de fondos para abordar el estudio de algunas especies marinas y de ecosistemas litorales sometidos a grandes fluctuaciones en los factores físicos y químicos. Estos estudios requieren la formación de equipos multidisciplinares y un considerable soporte económico. La acuicultura precisa todos estos trabajos y puede ser el estímulo para que puedan llevarse a cabo. El interés de los medios políticos por los cultivos marinos es consecuencia de otros planteamientos, como la situación de la pesca y la creación de puestos de trabajo.

Más que lo que su título indica, el libro ofrece una panorámica de lo que es la acuicultura marina, restringida a las especies de nuestro litoral que han sido objeto de alguna atención, de forma general, pasando a continuación a los sistemas aplicados a cada especie. Esta parte ocupa algo más de la mitad del volumen. Un diez por ciento del mismo se dedica a describir las posibilidades de los cultivos en distintos puntos del litoral. El método utilizado para ello por el autor es asignar una producción por unidad de superficie para cada sistema de cultivo y grupo zoológico (moluscos, crustáceos y peces) y multiplicar la superficie que considera útil en cada zona por dicho valor. Teniendo en cuenta que las temperaturas en las distintas zonas son diferentes y que unas especies pueden llegar a tener un crecimiento doble que otras, los valores estimados deben tomarse con mucha precaución.

A continuación se hace una breve referencia a las empresas y centros estatales dedicados al tema, un listado de disposiciones legales sobre acuicultura marina y unas conclusiones en las que se recomiendan una serie de medidas para el desarrollo de la acuicultura marina. Al final se incluyen tres anexos sobre cultivo de fitoplancton, rotíferos y *Artemia salina*, para finalizar con una selección de referencias bibliográficas.

En conjunto el libro puede considerarse dirigido al sector empresarial y por ello el autor ha debido verse obligado a dar unas cifras de producción en una materia en que, dado su actual desarrollo en el mundo, creemos que sólo cabe la mera especulación. La selección bibliográfica puede resultar útil a quienes quieran introducirse en el tema, aunque extraña la omisión de algunos trabajos nacionales que pueden encontrarse en cualquier bibliografía extranjera y la referencia a trabajos que carecen de vigencia en la actualidad. (E. P. V.)

Introducción a la Psicología Matemática, por Clyde H. Coombs, Robyn M. Dawes, Amos Tversky. Madrid, Alianza Editorial, 1981. Si el libro publicado por Alianza, dado el nombre de la colección –textos–, y el resto de los libros que hasta ahora la componen, va dirigido al alumnado de psicología, hemos de hacer unas precisiones previas sobre el título y el contenido de éste. Como se deduce de la lectura del índice, esta *Psicología Matemática* no incluye, en absoluto, ningún epígrafe de los que suelen integrar los programas que con este nombre se cursan en las distintas facultades de psicología españolas, que suelen ser temas estadísticos aplicados. El problema de los nombres y contenidos fue tratado en una reunión nacional de especialistas del área (18-XII-1981) en la Universidad Complutense de Madrid, y en las conclusiones se reservó este nombre para modelos psicológicos matematizados (que incluiría muchos de los capítulos de este libro), debiéndose enseñar esta materia en el segundo ciclo (todavía por implantar en muchas facultades). No se deduce tampoco de la introducción de los autores qué puede ser definido como psicología matemática –al menos de una forma diferencial–, ya que si la describen como "el intento de utilizar métodos matemáticos para investigar problemas psicológicos" (pág. 15) la misma carta de métodos tienen todas las técnicas estadísticas experimentales, tácitamente excluidas de esta consideración.

Consta el libro de tres partes y diez capítulos, aunque mejor sería decir

diez partes, ya que partidos e independientes están cada uno de ellos. La ventaja obvia de esta composición –acentuada por la división matemática de la ejecución entre los tres autores– es que se puede utilizar cada capítulo como un texto en sí (sin necesidad de los precedentes); pero tiene la desventaja de que la obra presenta una clara desconexión interior.

Creemos que incurre esta edición en un mal corriente en España: el del gran retraso respecto a la publicación original (1970). Más de diez años en una materia joven en constante investigación son muchos. Dice el propio Coombs, refiriéndose a la literatura sobre modelos en teoría del aprendizaje, que en 1966 ya se dejaban de citar trabajos anteriores a 1960. Claro que si lo comparamos con la pobreza absoluta de traducciones en nuestra área (el texto más reciente de no-paramétrica es del 56) hemos de alegrarnos de la difusión que esto supone.

Vemos en la heterogeneidad la característica más reseñable del libro, en cuanto a profundidad, grado de formalización y áreas de interés a las que puede ir dirigido. Por un lado, la teoría de la medición (cap. 1) sería deseable que fuera estudiada por todos los futuros alumnos de ciencias (físicas y sociales) en COU. El capítulo 4 (modelos no numéricos) es imprescindible para el estudio de la psicología social. A la teoría de la decisión pueden ser invitados tanto sociólogos y pedagogos como economistas (cap. 5); mientras que el dedicado a la matemática de aprendizaje (9) puede resultar abstruso a los no familiarizados con el tema. Tiene como virtud general –característica de los autores americanos– la presentación de cuidadosos informes experimentales, que, además de aclarar, inducen nuevas líneas de investigación.

En el capítulo 3, escrito por Coombs, sobre teoría de datos, se propone una clasificación de las observaciones en las ciencias de la conducta con arreglo a una doble dicotomía: por un lado, las relaciones entre los objetos pueden ser de orden (dominancia) y de proximidad (consonancia) y, por otro, de un solo conjunto o entre varios conjuntos. Esto le permite establecer una tabla de 2 × 2 para todas las combinaciones. (El lector cuidadoso comprobará que el concepto utilizado de matriz supradiagonal es particular, ya que es más general definir cada conjunto por una distancia única, generándose matrices cuadradas para las comparaciones de un conjunto consigo mismo y rectangulares para las comparaciones entre varios.) Dentro de cada combinación de datos desarrolla un modelo: *a*) Dominancia/un conjunto, ley de Thurstone del juicio comparativo (1927a). *b*) Dominancia /dos conjuntos, análisis de escalogramas de Guttman (1944). *c*) Proximidad/dos conjuntos, elección preferencial, Coombs (1950). *d*) Proximidad/un conjunto, métodos de Kruskal (1964a) y de Guttman-Lingoes (1966, 1969). Como todos los modelos presentan datos empíricos hay dos objeciones que no queremos dejar pasar: *1*) Para comprobar el grado de ajuste de los escalogramas de Guttman se presenta un coeficiente de reproductibilidad donde no sólo no especifica la fórmula de su cálculo, sino que reconoce no ser precisa la interpretación de sus valores. *2*) Para poder desarrollar las escalas de medida de Thurstone hay que suponer la normalidad y homocedasticidad de las distribuciones de los procesos discriminales, y no se cita su comprobación ni, en su caso, las consecuencias de la violación de los supuestos.

Resulta fuera de contexto la inclusión –por otra parte excepcionalmente clara– de la introducción a la simulación en psicología en el capítulo 4, escrito por Dawes, sobre modelos no numéricos. Es este uno de los síntomas del tiempo pasado, ya que este apartado debería constituir hoy un capítulo por la importancia del tema y por los trabajos publicados. (Véase L. Jañez: *Simulación en Psicología*. Dpto. Psicol. Mat. Universidad C. Madrid, 1981.)

Tversky hace una buena exposición de la teoría de la decisión (cap. 5) con estudios aplicados. El comportamiento no lógico de las personas fue formalizado ya en 1738 por Bernoulli en el principio de utilidad esperada, que en la modernidad elaboraron Von Neumann y Morgensten (1947). "La teoría consiste en un conjunto de axiomas de preferencias entre las apuestas" (pág. 160). Allais (1953) ideó un contraejemplo donde se generan contradicciones entre los axiomas. (En la Universidad Autónoma de Madrid estamos investigando los parámetros que determinarían la función de utilidad según lo propuesto por Allais.) La última parte del capítulo estudia la inconstancia de las respuestas de los humanos entre varias situaciones similares, lo que forma las teorías probabilísticas de elección.

El capítulo 6 está dedicado integramente a la teoría de la detectabilidad de señales (TDS), que apareció por primera vez en 1954 y que constituye uno de los temas clásicos de la psicología matemática. "La TDS tiene sus raíces en la teoría estadística de la decisión y en la ingeniería eléctrica, en este último caso por su relación con el diseño de sensores" (pág. 211). Aunque los objetivos tradicionales han sido el área visual y auditiva, puede aplicarse a "cualquier contexto en el cual el estímulo sensorial sea ambiguo" (pág. 213).

Dada la enorme profusión de juegos de estrategias en la actualidad, es posible que el capítulo 7 ("Teoría de juegos: análisis abstracto de conflictos de intereses entre partes que interactúan conforme a reglas") tenga un público muy dispar, lo que no significa trivializar el tema.

Los procesos secuenciales (cap. 8) se acaban centrando en un solo tipo de modelo: las cadenas de Markov. En el primer ejemplo sobre el juego del dilema del prisionero no podemos menos que inquietarnos cuando, sobre la carrera de armamentos, se expone naturalmente que "el dominar al otro bando es preferible al desarme general" (pág. 304). Resulta criticable el hecho de que los dos experimentos presentados (Rapoport y Chammah 1965a y Raush 1965) como aplicación de los modelos dichos se acaben concluyendo que ninguno de los dos se ajustaba a las cadenas de Markov (en realidad son procesos de Markov) y a esto se añade el no analizar un modelo alternativo, ni examinar las consecuencias del no cumplimento de las características del proceso.

El último capítulo escrito por Coombs (9) aborda "una de las secciones más vigorosas de la psicología matemática general". Primeramente expone los modelos estocásticos de Bush y Mosteller y el no lineal, que son versiones modernas de la curva de aprendizaje negativamente acelerada y la función logística estudiadas primitivamente por Gulliksen. Cita el autor el pensamiento de Bush (cuyo punto de vista compartimos): "No se puede contrastar la bondad del ajuste y después tirar el modelo o enviarlo a la oficina de metrología". La comparación de los modelos que ajustan mejor o peor los datos experimentales ha de servir al investigador para reestudiar la teoría, mediante un proceso inductivo ("el papel de la creatividad está todavía asegurado", págs. 345).

Leemos una de las introducciones más claras sobre la teoría de la información (Dawes, cap. 10), pero se queda corta en cuanto a las aplicaciones en psicología, especialmente en cognitiva. (Véase, a este propósito, I. Delclaux y J. Seoane: *Psicología cognitiva y procesamiento de la información*. Pirámide, Madrid 1982.)

Por último, el libro cuenta con un apéndice matemático necesario para la comprensión del texto. (O. L. G.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

CULTIVO A GRAN ESCALA DE CELULAS DE MAMIFERO

Tissue Culture: Methods and Applications. Dirigido por Paul F. Kruse, Jr., y M. K. Patterson, Jr. Academic Press, 1973.

Cell Culture. Dirigido por William B. Jacoby e Ira H. Pastan. Academic Press, 1979.

Optimizing Culture Conditions for the Production of Animal Cells in Microcarrier Culture. J. M. Clark y M. D. Hirtenstein en *Annals of the New York Academy of Sciences*, volumen 369, págs. 33-46; 1981.

MAQUINAS QUE CAMINAN

Adaptive Locomotion of a Multilegged Robot over Rough Terrain. R. B. McGhee y G. I. Iswandhi en *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-9, n.º 4, págs. 176-182; 1979.

Dynamic Stability and Resonance in a One-legged Hopping Machine. M. H. Raibert en *Proceedings of the 4th Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*, dirigido por A. Morecki, G. Bianchi y K. Kedzior. Elsevier Scientific Publishing Co., 1981.

A Walking Robot. Ivan E. Sutherland. The Marcian Chronicles, Inc., Pittsburgh, 1982.

CELULAS CILIADAS DEL OIDO INTERNO

Sensitivity, Polarity, and Conductance Change in the Response of Vertebrate Hair Cells to Controlled Mechanical Stimuli. A. J. Hudspeth y D. P. Corey en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 74, n.º 6, págs. 2407-2411; junio, 1977.

HUELLAS DE PISADAS DE ANIMALES EXTINTOS

Die Fossilien Caurierfährten. Hartmut Haubold. Die Neue Brehm-Bücherei, Ziemsen, Wittenberg Lutherstadt, 1974.

Fossil Tracks and Impressions of Vertebrates. William A. S. Sarjeant en *The Study of Trace Fossils: A Synthesis of Principles, Problems, and Procedures in Ichnology*, dirigido por Robert W. Frey. Springer-Verlag; Heidelberg, 1975.

ESPECTROSCOPIA DE RMN DE CELULAS VIVAS

Mapping of Metabolites in Whole Animals by ^{31}P NMR Using Surface Coils. Joseph J. H. Ackerman, Thomas H. Grove, Gordon G. Wong, David G. Gadian y George K. Radda en *Nature*, vol. 283, n.º 5743, págs. 167-170; enero, 1980.

Examination of a Case of Suspected McArdle's Syndrome by ^{31}P Nuclear Magnetic Resonance. Brian D. Ross, George K. Radda, David G. Gadian, Graeme Rocker, Margaret Esiri y James Falconer-Smith en *The New England Journal of Medicine*, vol. 304, n.º 22, págs. 1338-1342; 28 de mayo de 1981.

In vivo Carbon-13 Nuclear Magnetic Resonance Studies of Mammals. J. R. Alger, L. O. Sillerud, K. L. Behar, R. J. Gillies, R. G. Shulman, R. E. Gordon, D. Shaw y P. E. Hanley en *Science*, vol. 214, n.º 4521, páginas 660-662; noviembre, 1981.

Nuclear Magnetic Resonance and Its Applications to Living Systems. David G. Gadian. Oxford University Press, 1982.

FISICA DE LOS TUBOS DE ORGANO

Sound Production by Organ Flue Pipes. N. H. Fletcher en *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 60, n.º 4, páginas 926-936; octubre, 1976.

Harmonic Generation in Organ Pipes, Recorders and Flutes. N. H. Fletcher y Lorna M. Douglas en *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 68, n.º 3, págs. 767-771; septiembre, 1980.

Wave Propagation on Turbulent Jets, II: Growth. S. Thwaites y N. H. Fletcher en *Acustica*, vol. 51, n.º 1, págs. 44-49; junio, 1982.

ORIGEN DE LA RADIACION COSMICA X DE FONDO

The Luminosity of Serendipitous X-Ray QSOs. Bruce Margon, Gary A. Chanan y Ronald A. Downer en *The Astrophysical Journal*, vol. 253, n.º 1, 2.ª parte, págs. L7-L11; 1 de febrero de 1982.

INICIOS DE LA AGRICULTURA EN LA PENINSULA IBERICA

Los Complejos Microlaminares y Geométricos y del Epipaleolítico Mediterráneo Español. J. Fortea en *Memorias del Seminario de Prehistoria y Arqueología*, n.º 4; Salamanca, 1973.

Segunda Campaña de Excavaciones en la Cueva de los Murciélagos, Zuheros (Córdoba). A. M. Vicent y A. M. Muñoz en *Excavaciones Arqueológicas de España*, n.º 77; Madrid, 1973.

La Cultura de las Cuevas con Cerámica Decorada en Andalucía Oriental, 2 vol. M. S. Navarrete. Universidad de Granada; 1976.

El Neolítico de la Península Ibérica. Estado Actual de los Problemas Relativos al Proceso de Neolitización y Evolución de las Culturas Neolíticas. B. Martí, en *Papeles del Laboratorio de Arqueología-Saguntum*, n.º 13, págs. 59-98; Valencia, 1978.

Cova de l'Or (Beniarrés, Alicante), vol. 1 y 2. B. Martí y otros. *Trabajos Varios del S.I.P.*, n.ºs 51 y 63; Valencia, 1977 y 1980.

TEMAS METAMAGICOS

El Azar y la Necesidad. Ensayo sobre la Filosofía Natural de la Biología Moderna. Jacques Monod. Barral Editores; Barcelona, 1971.

El Gen Egoísta. Richard Dawkins. Editorial Labor; Barcelona, 1979.

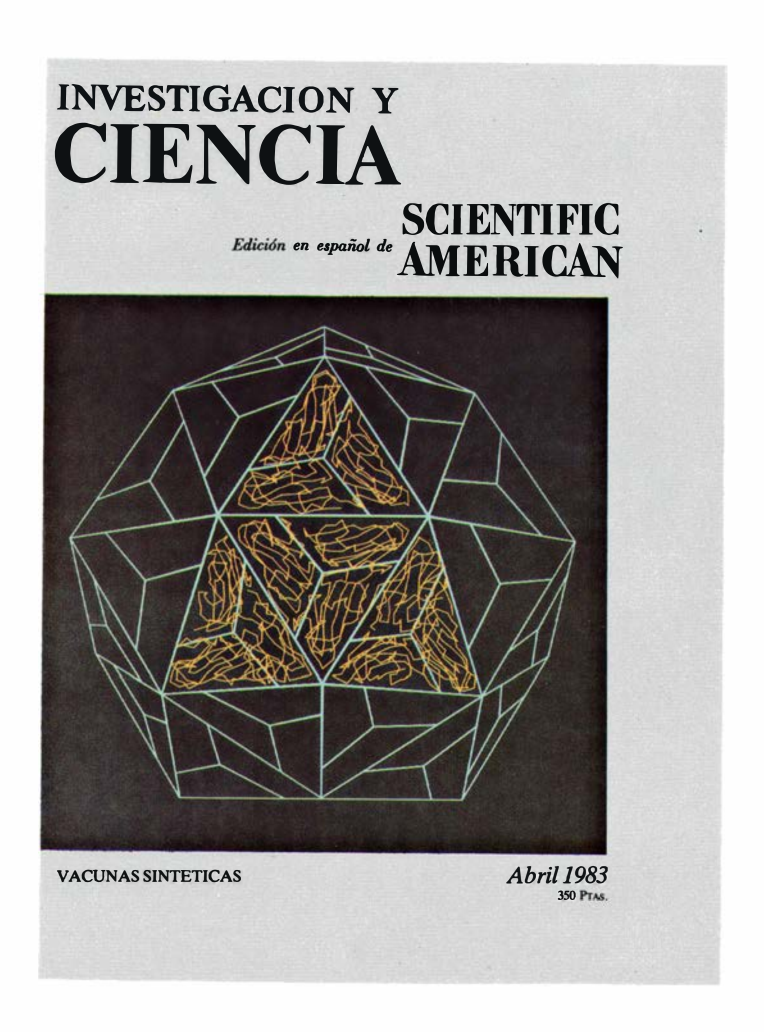
The Scheme of Things. Allen Wheelis. Harcourt Brace Jovanovich, Inc., 1980.

Thetamagical Memas: Sentence-like Viruses and Self-structuring Replicators. Egbert B. Gebstadter en *Literary Australian*, vol. 1, n.º 248, págs. 22-14; enero, 1983.

TALLER Y LABORATORIO

Listening to the Doppler Shift of Visible Light. R. E. Crandall y E. H. Wishnow en *American Journal of Physics*, vol. 49, n.º 5, págs. 477-478; mayo, 1981.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



TEORIA RETICULAR DEL CONFINAMIENTO DE LOS QUARKS, por Claudio Rebbi
Se ha simulado la fuerza entre quarks en el protón imponiendo una red discreta en la estructura del espacio y el tiempo.

PROCESOS VISUALES OCULTOS, por Jeremy M. Wolfe
Suele considerarse la visión un sentido aislado. Se ha descubierto, sin embargo, que el sistema visual comprende subsistemas cuyo funcionamiento suele quedar oculto a la conciencia del perceptor.

LA CORONA SOLAR ACTIVA, por Richard Wolfson
Antes sólo apreciable durante los eclipses, la nacarada envoltura del Sol está ahora en constante observación.

LAS RANAS DE LOS DARDOS VENENOSOS, por Charles W. Myers y John W. Daly
En Colombia, los cazadores indios emponzoñan los dardos de sus cerbatanas con un alcaloide altamente tóxico que segregan unas pequeñas ranas.

BOVEDAS DE ABANICO, por Walter C. Leedy, Jr.
Durante el siglo XIV, los maestros canteros ingleses convirtieron la bóveda nervada gótica en un esqueleto arquitectónico ondulante.

VACUNAS SINTETICAS, por Richard A. Lerner
Una breve cadena de aminoácidos, ensamblada en el laboratorio, que reproduce una zona de la superficie de una proteína vírica, puede originar anticuerpos de especificidad predeterminada que confieren inmunidad frente al virus.

ORDENADORES OPTICOS, por Eitan Abraham, Colin T. Seaton y S. Desmond Smith
Un ordenador que funcionara con haces de luz en vez de corriente eléctrica podría ejecutar un billón de operaciones por segundo. Se ha fabricado ya su componente esencial: un análogo óptico del transistor.

FLUIDEZ DE LAS MEMBRANAS CELULARES, por Juan C. Gómez-Fernández y Félix M. Goñi
La utilización de modelos de membranas semisintéticos y la aplicación de técnicas físicas nos permiten valorar la fluidez de las envolturas celulares.

